UNIVERSIDADE DO ALGARVE
FACULDADE DE CIÊNCIAS DO MAR E DO AMBIENTE

A Hidrodinâmica e o Transporte Sedimentar no Estuário do Rio Mondego

(Tese para a obtenção do grau de doutor no ramo de Ciências do Mar, especialidade de Geologia Marinha)

Duarte Nuno Ramos Duarte

Co-orientadores:
Tomasz Boski, Professor Catedrático na FCMA da UAlg.
João Manuel Alveirinho Dias, Professor Associado na FCMA da UAlg.
Rui Paulo Bento Pena dos Reis, Professor Catedrático na FCT da UC.

Constituição do Júri:
Presidente:
José Pedro Andrade, Professor Catedrático na FCMA da UAlg.

Vogais:
Jackson O. Blanton, Full Professor on Skidaway Institute of Oceanography of Unversity System of Georgia, EUA (Relator).

Rui Pires Matos Taborda, Professor Auxiliar na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Relator).

FARO

2008

NOME: Duarte Nuno Ramos Duarte
FACULDADE: Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente
CO-ORIENTADORES: Professor Catedrático Tomasz Boski
Professor Doutor João Manuel Alveirinho Dias
Professor Catedrático Rui Paulo Bento Pena dos Reis
DATA: Junho de 2007
TÍTULO DA TESE: A Hidrodinâmica e o Transporte Sedimentar no Estuário do Rio Mondego

RESUMO

Esta dissertação teve por principal objectivo o estudo da hidrodinâmica e do transporte sedimentar de fundo no estuário do Mondego, através da caracterização dos processos de mistura, estratificação e da circulação nos principais canais do estuário. Avaliaram-se os impactes das obras de regularização do braço norte.

A fisiografia regularizada do braço norte facilitou a circulação dos escoamentos fluviais ao longo do canal principal, e favoreceu a entrada da maré para o interior do estuário em resultado da redução significativa do atrito de fundo deste canal, que por sua vez se traduziu numa entrada de sedimentos marinhos localizados no seu sector distal.

A propagação da maré no canal principal foi definida por um domínio da enchente, com um comportamento hipo-síncrono, estacionário com uma pequena componente progressiva. Aquando de maiores caudais do Mondego, passou a definir um domínio de vazante e uma distorção estacionária+progressiva+fluvial. No braço sul apresentou-se praticamente estacionária e foi caracterizada por uma ligeira tendência evolutiva de domínio de vazante e por um comportamento hipso-síncrono.

Nos regimes bem misturados e dominados pela maré, a resultante do transporte sedimentar de fundo tendeu a fazer-se para dentro do estuário, enquanto nos quadros muito estratificados processou-se inversamente.

Palavras chave: estuário, hidrodinâmica, "transporte sedimentar", "tempos de residência"

The Hidrodynamic and Sediment Transport in the Estuary Mondego River

ABSTRACT

The principal aim of the work presented in this Dissertation was the study of the hydrodynamics and bottom sediment transport in the Mondego estuary, based on the characterization of mixture processes, circulation and stratification in the main estuary channels. The impact of the regularization of the north channel was assessed.

The regularized physiography in the north branch enabled the circulation of fluvial flow through the main channel. This also favoured the entry of the tide into the estuary, as a result of the reduced drag friction in the bottom of this channel, and the associated entrance of marine sediments located in its distal sector.

The propagation of the tide in the main channel was determined by a flood dominance behaviour, showing a hypo-synchronous and stationary behaviour, with a minor progressive component. An ebb dominance and stationary+progressive+fluvial distortion are stablished under higher fluvial discharges.

In the south arm, the propagation was almost stationary, being characterized by a small evolutive tendency for ebb dominance and a hypso-synchronous behaviour.

The resultant of the bottom sediment transport in the mixed regimens, dominated by the tide, was mainly towards the estuary, while in the more stratified cases it was in the opposite direction.

Keywords: estuary, hidrodynamic, "sediment transport", "residence time"

Agradecimentos

Chegado a este momento em que termino um trabalho que tanto gosto me deu, não posso deixar de agradecer, talvez não a todos os que se envolveram comigo nesta jornada, pelo menos àqueles sem os quais nada disto teria sido possível.

Ao Professor Tomasz Boski meu orientador científico, que desde a minha entrada na universidade do Algarve, sempre me apoiou, pelos conhecimentos científicos, pelo esforço em me proporcionar todos os meios necessários a este trabalho e pelos seus ensinamentos.

Ao Professor Alveirinho Dias pela sua orientação científica. O seu incentivo e simpatia foram preciosos, esforçar-me-ei para poder contar com o seu apoio e confiança.

Ao Professor Rui Pena um especial obrigado, porque para além da sua orientação científica, a ele devo a minha iniciação nos estudos da Geologia Marinha e com ele comecei este trabalho. Pela confiança que depositou em mim, pela disponibilidade e todo o apoio prestado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, com quem tive o privilégio de me cruzar.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia, por me ter concedido as bolsas JNICT BIC.PRJ/72, BD/722/90/IG e a bolsa parcial PRAXIS XXI BD/3633/94 com as quais iniciei este trabalho, e por ter esperado pela redacção da tese.

À universidade do Algarve, que me acolheu e me permitiu continuar um trabalho no qual depositei todo o meu empenho.

Ao IMAR, polo de Coimbra, em especial ao seu director, Professor João Carlos Marques, pela cedência de equipamento e instalações laboratoriais fundamentais para a elaboração deste trabalho, bem como, pelo apoio e amizade.

Ao IMAR-FLAD que ao me conceder dois estágios de aprendizagem de técnicas de modelação nos EUA, proporcionou-se também travar conhecimento com o Professor Jackson O. Blanton, e a ele um especial obrigado pelos seus ensinamentos científicos, pela sua amizade e pela hospitalidade.

Ao Óscar Ferreira, sempre disponível, pela indispensável ajuda na leitura, discussão e troca de opiniões sobre a hidrodinâmica do estuário, e também pela sua amizade.

Ao Rui Taborda, pela tão valiosa troca de conhecimentos, pela discussão do transporte sedimentar, pelo apoio e pelas suas sugestões.

À Delminda Moura e à Cristina Veiga Pires, pela amizade, disponibilidade e apoio constantes. Obrigado por terem uma palavra amiga quando é necessário.

Ao José Paulo Monteiro, meu colega de gabinete e amigo, pela paciência, pela amizade e também pela orientação no tratamento cartográfico.

À Maria Helena Gonçalves pelo apoio estatístico prestado.

Ao Sr. Lapierre pelo apoio informático incondicional, que contrariou todas as *Leis de Murphy*.

Aos Professores Doutores Seabra Santos e Antunes do Carmo do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, pelo auxílio no planeamento dos trabalhos de campo desenvolvidos no estuário do Mondego, por me terem iniciado na temática do transporte sedimentar e pelas profícuas trocas de conhecimentos.

Ao Paulo Frias e ao Tó Miguel, amigos de longa data, que executaram comigo as tarefas de campo e algumas de laboratório sem nunca recusar, sempre incansáveis, um muito obrigado.

Ao Paulo Relvas por ter adaptado o Programa SIGMAT para as séries de dados do estuário do Mondego.

Uma palavra de apreço muito especial para a Maria Helena Henriques pela amizade com que sempre pude contar.

Não posso esquecer os Senhores António Moura e o Armando, técnicos da FCTUC pela paciência, amizade e auxílio imprescindível na construção de alguns dos equipamentos usados neste trabalho, nomeadamente os amostradores de sedimento.

À Ilda e à Florinda, sempre disponíveis, sempre presentes, obrigado.

Correndo o risco mas sem querer esquecer alguém, um obrigado a todos aqueles que contribuíram de uma forma ou de outra para que este trabalho terminasse.

Aos meus pais, obrigado por tudo.

Por fim, à Marta à Inês e à Manuela, pelo apoio e compreensão.

Lista de Símbolos, Índices e de Notações Especiais

Símbolos	Designações	Unidades
a	área, área de transporte	m^2
A_w	altura da onda de maré	m
η_w	altura de variação do nível da água	m
B	largura	m
b	factor de retorno	(-)
C_d	coeficiente de rugosidade	(-)
d	densidade relativa de um líquido	(-)
d_s	densidade relativa das partículas sedimentares $d_s=\rho_s/\rho_{ap}$	(-)
D_{50}	diâmetro dos sedimentos correspondentes ao percentil em peso de 50	m
n_s	parâmetro de estratificação	(-)
R_i	número de Richardson	(-)
g	aceleração da gravidade (g=9.81)	ms^{-2}
h	altura do escoamento	m
L	comprimento	m
Q	caudal líquido	$m^3\ s^{-1}$
P	prisma de maré	m^3
R	volume fluvial	m^3
$q_{sb/m}$	caudal sólido de fundo por metro linear	$m^3/s/m$
R_e	número de Reynolds para todo o escoamento	(-)
R_{e*}	número de Reynolds de fronteira	(-)
t	tempo	h
T	Período, período de maré (T=12.42h)	h

u	velocidade da corrente	$m\ s^{-1}$
u_w	velocidade de propagação da onda de maré ou celeridade	$m\ s^{-1}$
u_*	velocidade de corte de fundo	$m\ s^{-1}$
$\bar{u}$	velocidade média da corrente	$m\ s^{-1}$
U	amplitude da velocidade da maré	m
V	volume de um escoamento	m^3
z_0	coeficiente de rugosidade	m
z	altura acima do fundo	m
κ	constante de von Karman (κ=0.4)	(-)
ρ	densidade ou massa específica do fluido	$kg\ m^{-3}$
ρ_{ap}	densidade ou massa específica da água pura	$kg\ m^{-3}$
ρ_s	massa específica das partículas de um sedimento ($\rho_s=\rho d_s$)	$kg\ m^{-3}$
k_n	rugosidade hidráulica	m
τ	tensão de corte	$N\ m^{-2}$
ν	viscosidade cinemática ($\nu=\mu/\rho$)	$m^2\ s^{-1}$
ω	frequência da maré	h
μ	viscosidade molecular	Pa s
γ	fase dos níveis da água da maré	° graus
υ	fase das velocidades da maré	° graus

Índices

b	relativo às condições junto ao fundo
s	relativo às condições de superfície
g	componente gravítica
max	valor máximo
o	condições de referência

T total

Ox componente segundo x

Oy componente segundo y

Oz componente segundo z

e relativo à enchente

v relativo à vazante

E relativo ao estuário

Notações especiais

$\bar{x}$ média de x

BM baixa-mar

PM preia-mar

EPM estofa da preia-mar

EBM estofa da baixa-mar

Símbolos matemáticos

Δ variação (valor final – valor inicial)

∂ gradiente

Índice geral

Itens: **Páginas:**

Resumo.....i
Abstract ii
Agradecimentos iii
Lista de Símbolos, Índices e de Notações Especiais viii
Índice Geral
Índice de Figuras
Índice de Quadros
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO 1
1.1. Enquadramento Teórico do Trabalho 1
1.2. Interesse do Tema e Contribuição para o Conhecimento 3
1.3. Objectivos do Trabalho 5
1.3.1. Objectivos gerais 5
1.3.2. Objectivos específicos 5
1.4. Estrutura Geral do Trabalho 6
CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO 9
2.1. Enquadramento do Estuário do Mondego 9
2.2. Descrição Fisiográfica do Estuário 11
2.3. Principais Intervenções Antrópicas 22
2.3.1. Fontes Poluidoras 25
2.4. Descrição Hidrodinâmica e do Transporte sedimentar 26
2.4.1. Estuário 26
2.4.2. Troço Fluvial Adjacente ao Estuário 30
2.4.3. Zona Costeira Adjacente à Foz do Estuário 33
2.5. Enquadramento Geomorfológico do Baixo Mondego 38
CAPÍTULO 3 - REVISÃO DA LITERATURA 43
3.1. Revisão Conceptual da Literatura 43
3.2. Trabalhos Realizados por Outros Autores no Estuário 64
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS e MÉTODOS 71
4.1. Métodos de Campo 71
4.1.1. Distribuição Espacial dos Pontos de Amostragem no Estuário 71
4.2. Tratamento Laboratorial 86
4.3. Tratamento Matemático e Estatístico dos Dados 89
4.4. Pressupostos e Considerações 112

4.5. Representatividade das Estações Estuarinas 115
4.6. Limitações Impostas pelas Metodologias Adoptadas 116
CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 119
5.1. Variação da Superfície Livre no Estuário 119
5.1.1. Patamares Médios da Maré 120
5.1.2. Variação Longitudinal da Superfície Livre 122
5.1.3. Ambientes Considerados 127
5.1.4. Constituintes Harmónicas M_2 e M_4 da Variação da Superfície Livre 129
5.2. Análise Fisiográfica do Estuário …….....131
5.2.1. Distribuição Espacial dos Ambientes Submareais, Intermareais e Supramareais 132
5.2.2. Análise Dimensional do Estuário 149
5.2.2.1 Dimensões Médias do Estuário 149
5.2.2.2 Razão Largura/Profundidade 154
5.2.2.3 Parâmetros Adimensionais 168
5.2.3. Unidades Fisiográficas 171
5.3. Hidrodinâmica e Circulação no Estuário 173
5.3.1. Massas de Água, Mistura e Estratificação 173
5.3.1.1. Massas de Água e Domínios do Estuário 173
5.3.1.2. Mistura e Estratificação 181
5.3.2. Hidráulica dos Escoamentos 269
5.3.2.1. Padrões de Circulação 269
5.3.2.2. Classificação dos Escoamentos 294
5.3.2.3. Tensões de Corte na Camada Limite de Fundo 297
5.3.3. Parâmetros Maregráficos 303
5.3.3.1. Relações Entre os Erros Cometidos 304
5.3.3.2. Períodos de Enchente 305
5.3.3.3. Períodos de Vazante 308
5.3.3.4. Velocidades Máximas da Enchente 311
5.3.3.5. Velocidades Máximas da Vazante 318
5.3.3.6. Comparação das Magnitudes das Velocidades Máximas 322
5.3.3.7. Amplitude de Variação da Velocidade 323
5.3.3.8. Força da Maré 328
5.3.4. Circulação de Volumes no Estuário 333
5.3.4.1. Volumes de Vazante 333

5.3.4.2. Volumes de Enchente.....336
5.3.4.3. Volumes de Enchente na Secção da BM.....340
5.3.4.4. Prisma de Maré.....342
5.3.4.5. Relações entre os Prismas de Maré e as Descargas Fluviais.....353
5.3.4.6. Tempos de Residência e Descargas Fluviais.....362
5.3.5. Distorção da Maré 367
5.3.5.1. Distorção Total da Maré.....368
5.3.5.2. Distorção da Maré na PM.....376
5.3.5.3. Distorção da Maré na BM.....383
5.3.5.4. Variação da Distorção dos Escoamentos na Coluna de Água.....388
5.3.5.4.1. Estação da Embocadura.....388
5.3.5.4.2. Estação da Gala.....399
5.3.5.4.3. Estação dos Cinco Irmãos.....405
5.3.5.4.4. Estação Elevatória.....411
5.4. Transporte Sedimentar no Estuário do Mondego.....415
5.4.1. Caracterização dos Sedimentos no Estuário.....415
5.4.2. Taxas de transporte sedimentar de fundo medidas no estuário.....418
5.4.3. Modelo Conceptual de Circulação e do Transporte Sedimentar.....425
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES 429
6.1. Conclusões Gerais.....429
6.2. Importância dos Resultados Obtidos.....438
6.3. Trabalhos Futuros 440
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....443

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1. Bacia hidrográfica do rio Mondego e localização geográfica das barragens e açudes. Retirada do "*web site*" da Direcção Geral do Ambiente 9

Figura 2.2. Levantamento batimétrico do estuário do Mondego (já vectorizado), composto pela sobreposição dos levantamentos parciais dos troços: Cinco Irmãos-ponte de Formoselha (Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, 1976), pelo levantamento do braço sul (Direcção Geral de Portos, 1988) e pelo levantamento referente à embocadura e ao braço norte do estuário (Direcção Geral de Portos, 1991) 17

Figura 2.3. Levantamento batimétrico do estuário do Mondego (já vectorizado), composto pela sobreposição dos levantamentos parciais dos troços: Cinco Irmãos-ponte de Formoselha (Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, 1976), pelo levantamento do braço sul (Direcção Geral de Portos, 1988) e pelo levantamento referente às obras de regularização do troço compreendido entre a Ponte da Figueira da Foz e os Cinco Irmãos, efectuado Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (1995). As siglas SDE e SME representam os sectores distal e proximal da embocadura, as siglas SDBN, SMBN e SPBN assinalam os sectores distal, médio e proximal do braço norte, a sigla LRBM representa o sector estuarino do Leito Regularizado do Baixo Mondego, e por fim SDBS, SMBS e SPBS representam os sectores distal, médio e proximal do braço sul 18

Figura 2.4. Caudais totais anuais dos principais afluentes do Mondego no Baixo Mondego tendo por base os registos hidrológicos dos anos de 1973 a 1990 para as estações limnigráficas do Açude de Ponte de Coimbra, da estação da Ponte do Casével (rio Ega), da estação da Ponte Mocate (rio Arunca), da estação do casal da Rola (rio Pranto) e da estação da Ponte de Azenha Nova (rio Foja). Os caudais medidos no Açude de Ponte em Coimbra contribuíram para o caudal escoado na zona estuarina em cerca de 89.96% (≈90%), enquanto o Arunca em 6.63%, o Ega em 1.28%, o Pranto em 1.58% e o rio Foja em 0.55%, para o ano hidrológico de 1988/89. Retirado de Baptista *et al* (1995).....32

Figura 2. 5. Principais unidades morfo-estruturais com incidência na paisagem. Unidades fisiográficas litorais (I. sector a norte da Serra da Boa Viagem; II. Serra da Boa Viagem; III. sector entre a Serra da Boa Viagem e a foz do rio Mondego; IV. sector a sul da foz do Mondego); 1. Maciço Hespérico; 2. Serras e planaltos calcários; 3. Colinas gresosas; 4. Superfície plio-Calabriana; 5. Planície aluvial; 6. Planície litoral; 7. Vertente escarpada de motivação litológico-

estrutural; 8. Escarpa de falha; 9. Frente de costeira; 10. Diapiro de Soure; 1. Limite da bacia hidrográfica. Retirado de Almeida *et al* (1990).....40

Capítulo 3

Figura 3. 1. Localização geográfica das estações de amostragem definidas em Baptista (1990) e em Baptista *et al* (1995). As estações localizadas no canal principal, 1, 2, 3 e 4 distaram da foz do estuário ≈17km, ≈12km, ≈5.5km e ≈1.6km. A do braço sul (estação 5) distou 4.1km. A estação 6 situada ao largo da foz foi simbolicamente posicionada a ≈-1km da foz.....67

Capítulo 4

Figura 4. 1. Limite superior do estuário, correspondente a um açude de enrocamento com disposição transversal ao canal do Mondego, localizado a ≈1km a montante da Ponte de Formoselha.....72

Figura 4.2. Localização geográfica das quatro estações do estuário. A estação da Embocadura (Emb), dos Cinco Irmãos (5I), estação Elevatória (EE) e estação da Gala (G).....73

Figura 4. 3. Esquema de uma secção transversal de um canal trapezoidal. Ilustração da subárea a(2,3,k) da respectiva secção transversal.....76

Figura 4. 4. Embarcação usada nas actividades de campo (IMAR-Coimbra).....76

Figura 4. 5. Aparelhos usados na medição de parâmetros físicos no estuário. A fotografia a) mostra a estrutura que integra todas as sondas usadas para a medição de parâmetros físicos. Da esquerda para a direita, sonda de medição da temperatura e condutividade eléctrica, as duas seguintes corresponderam a sondas para a medição da distância relativa ao fundo, turbidez e concentração de partículas em suspensão. As duas posicionadas no centro da figura mediam a temperatura, pH, Eh e teor em oxigénio. No lado direito encontra-se o molinete usado para medir a componente horizontal da velocidade. A fotografia b) mostra os respectivos equipamentos. De trás para a frente e da esquerda para a direita correspondem: ao mostrador analógico do correntómetro; ao aparelho de medir a temperatura e condutividade eléctrica, e o terceiro ao turbidimetro e medidor da profundidade relativa na coluna de água. Na linha da frente, estão a sonda de medição de concentração de partículas em suspensão, o aparelho de medição do Eh, pH e potencial redox; e por fim o aparelho de medir o teor em oxigénio na água.....77

Figura 4. 6. Fotografia do amostrador de sedimentos de fundo, do tipo "van Veen".....83

Figura 4.7. Fotografia do amostrador de água do tipo "van Dorn".....84

Figura 4. 8. Amostradores do transporte sedimentar. Fotografia a) amostrador do tipo "van trap". Fotografia b) amostrador do tipo "BTAM".....85

Figura 4.9. Marcha analítica rotineira para a caracterização petrográfica dos sedimentos. Representação esquemática das etapas laboratoriais seguidas no tratamento dos sedimentos.....87

Capítulo 5

Figura 5.1.1. Variação dos diferentes níveis críticos médios da superfície livre nos diversos sectores do estuário do Mondego. Projecção dos níveis adoptados para diferenciar as marés vivas das mortas. Na legenda, NivSup estabeleceu o nível máximo considerado atingido pela superfície livre aquando de cheias do Mondego ou de temporais. cP e bSul representaram respectivamente os diferentes níveis críticos da maré determinados para as estações do canal principal e do braço sul. A designação Est referiu-se aos patamares médios estimados para representar a variação da superfície livre em todo o estuário, enquanto est.1, est.2, est.3, est.4, est.5 e est.6 simbolizaram as estações 1, 2, 3, 4, 5, e 6 referenciadas na figura 3.1.....123

Figura 5.1.2. Variação da altura da maré nos diferentes sectores do estuário do Mondego. Projecção da altura da maré critica adoptada para diferenciar as maré.....124

Figura 5.2.1. Distribuição espacial dos diferentes ambientes definidos pela variação da superfície livre no estuário do Mondego, antes dos trabalhos de regularização do braço norte. Para os ambientes localizados abaixo do patamar médio $h_{x,y}$<+0.8mZH foram definidos os ambientes permanentemente imersos (ASP), para as zonas compreendidas entre os +0.8≤$h_{x,y}$<+1.2mZH foram cartografados os ambientes esporadicamente emersos apenas durante as marés vivas (AIEI). Os ambientes intermareais mais frequentes (AIF) foram definidos para +1.2≤$h_{x,y}$≤+2.8mZH, enquanto os ambientes esporadicamente imersos apenas durante as marés vivas (AIES) para +2.8<$h_{x,y}$≤+3.2mZH. Os locais do estuário inundados apenas durante quadros de marés de maior amplitude associados ou a sobre-elevação do nível do mar por fenómeno atmosféricos e/ou a grandes cheias do Mondego (AS), foram definidos para níveis compreendidos entre +3.2≤$h_{x,y}$≤+4.0mZH. Projectam-se também várias secções transversais dispostas longitudinalmente aos canais mais importantes do estuário e localizadas em sectores que poderão ser considerados representativos dos diferentes sectores fisiográficos anteriormente identificados.....139

Figura 5.2.2. Distribuição espacial dos diferentes ambientes definidos pela variação da superfície livre no estuário do Mondego, em 1995 durante os trabalhos de regularização do braço norte. Para os ambientes localizados abaixo do patamar médio $h_{x,y}$<+0.8mZH foram definidos os ambientes permanentemente imersos (ASP), para as zonas compreendidas entre os +0.8≤$h_{x,y}$<+1.2mZH foram cartografados os ambientes esporadicamente emersos apenas durante as marés vivas (AIEI).

Os ambientes intermareais mais frequentes (AIF) foram definidos para $+1.2 \leq h_{x,y} \leq +2.8$mZH, enquanto os ambientes esporadicamente imersos apenas durante as marés vivas (AIES) para $+2.8 < h_{x,y} \leq +3.2$mZH. Os locais do estuário inundados apenas durante quadros de marés de maior amplitude associados ou a sobre-elevação do nível do mar por fenómeno atmosféricos e/ou a grandes cheias do Mondego (AS), foram definidos para níveis compreendidos entre $+3.2 < h_{x,y} \leq +4.0$mZH. Projectam-se também várias secções transversais dispostas longitudinalmente aos canais mais importantes do estuário e localizadas em sectores que poderão ser considerados representativos dos diferentes sectores fisiográficos anteriormente identificados.....140

Figura 5.2.3. Distribuição espacial dos ambientes imersos para os diferentes patamares médios da superfície livre, antes das obras de regularização do braço norte, em 1991. Disposição espacial para os patamares médios para: $h_{x,y} \leq +0.8$mZH mapa a), $h_{x,y} \leq +0.9$mZH mapa b), $h_{x,y} \leq +1.2$mZH mapa c), $h_{x,y} \leq +1.3$mZH mapa d), $h_{x,y} \leq +1.5$mZH mapa e), $h_{x,y} \leq +2.0$mZH mapa f), $h_{x,y} \leq +2.5$mZH mapa g), $h_{x,y} \leq +2.8$mZH mapa h), $h_{x,y} \leq +3.1$mZH mapa i), $h_{x,y} \leq +3.2$mZH mapa j), $h_{x,y} \leq +3.3$mZH mapa l), $h_{x,y} \leq +4$mZH mapa m).....141

Figura 5.2.4. Distribuição espacial dos ambientes imersos para os diferentes patamares médios da superfície livre, com base no levantamento batimétrico de 1995. Disposição espacial para os patamares médios para: $h_{x,y} \leq +0.8$mZH mapa a), $h_{x,y} \leq +0.9$mZH mapa b), $h_{x,y} \leq +1.2$mZH mapa c), $h_{x,y} \leq +1.3$mZH mapa d), $h_{x,y} \leq +1.5$mZH mapa e), $h_{x,y} \leq +2.0$mZH mapa f), $h_{x,y} \leq +2.5$mZH mapa g), $h_{x,y} \leq +2.8$mZH mapa h), $h_{x,y} \leq +3.1$mZH mapa i), $h_{x,y} \leq +3.2$mZH mapa j), $h_{x,y} \leq +3.3$mZH mapa l), $h_{x,y} \leq +4$mZH mapa m).....142

Figura 5.2.5. Variações das áreas e dos volumes dos ambientes imersos para diferentes níveis da superfície livre (h_z), quer registados em todo o estuário, quer apenas no canal principal, e somente no braço sul. Na legenda, V_{Est}, V_{CP} e V_{BS} simbolizaram respectivamente os volumes imersos aferidos no estuário, no canal principal e apenas no braço sul, enquanto A_{Est}, A_{CP} e A_{BS} representaram as áreas dos ambientes imersos determinados para o estuário, para o canal principal e apenas para o braço sul. No gráfico, ASP figurou os ambientes sempre imersos do estuário, AS os ambientes supramareais inundados apenas durante episódios de cheia e/ou temporal, AIF os ambientes intermareais mais frequentes, e por fim AIEI e AIES simbolizaram respectivamente os ambientes intermareais esporadicamente inundados e emersos durante as marés vivas. Antes das obras de regularização do braço norte, a variação de volumes imersos no estuário seguiu uma distribuição polinomial $V_E = 1.1*10^6 h^2 + 4*10^6 h + 8.5x10^6$, com $r^2_{E,V,h} = 0.9998$, $r_{E,V,h} = 0.9999$, $p < 0.01$, $N_E = 10$, enquanto o canal principal apresentou $V_{CP} = 7.4*10^5 h^2 + 3.8*10^6 h + 7.4x10^6$, com

$r^2_{CP,V,h}$=0.9998, $r_{CP,V,h}$=0.9999, p<0.01, N_{CP}=10. Com as obras de regularização em curso, passou-se a ter $V_{E,O}=1.2*10^6h^2+3.4*10^6h+9.9x10^6$, com $r^2_{E,V,h,O}$=0.9998, $r_{E,V,h,O}$=0.9999, p<0.01, N_E=10 para o estuário, e $V_{CP,O}=8.2*10^5h^2+3.2*10^6h+8.8x10^6$, com $r^2_{CP,V,h,O}$=0.9998, $r_{CP,V,h,O}$=0.9999, p<0.01, N_{CP}=10 para o canal principal. Para o braço sul a variação dos volumes imersos foi definida por $V_{BS}=3.5*10^5h^2+2*10^5h+1.1x10^6$, com $r^2_{E,V,h}$=0.9998, $r_{E,V,h}$=0.9999, p<0.01, N_{BS}=10. Neste braço a variação das áreas imersas foi definida por $A_{BS}=-1.1*10^5h^2+1.2*10^6+2.5x10^5$, com $r^2_{E,A,□}$=0.994, $r_{E,A,□}$=0.997, p<0.01, N_{BS}=10. Estas variáveis foram consideradas independentes uma vez que $1 \leq t_{D\text{-}W} \leq 3$.....145

Figura 5.2.6. Diagrama representativo das variações da largura/profundidade dos dois principais braços do estuário do Mondego referentes aos patamares médios da superfície livre. Para o intervalo $0.8 < x,y,E < 1.5$mZH as regressões obtidas apartir do levantamento batimétrico de 1995 foram para o estuário $\Sigma \overline{h}_{E,O} \approx 0.016(\Sigma b_{E,O}) + 0.428$ com $r^2_{E,O}$=0.998, $r_{E,O}$=0.999, p<0.01, $N_{E,O}$=4 e para o canal principal $\Sigma \overline{h}_{CP,O} \approx 0.016(\Sigma b_{CP,O}) + 0.272$ com $r^2_{CP,O}$=0.999, $r_{CP,O}$=0.999, p<0.01, $N_{CP,O}$=4. Antes das obras de regularização foram $\Sigma \overline{h}_E = 0.013(\Sigma b_E) + 0.368$ com r^2_E=0.998, r_E=0.999, p<0.01, N_E=4; $\Sigma \overline{h}_{CP} \approx 0.012(\Sigma b_{CP}) + 0.243$ com r^2_{CP}=0.999, r_{CP}=0.999, p<0.01, N_{CP}=4; para o braço sul $\Sigma \overline{h}_{BS} \approx 0.014(\Sigma b_{BS}) + 0.949$ com r^2_{BS}=0.949, r_{BS}=0.992, p<0.01, N_{BS}=4. Para o [$+1.5 < x,y,E < 4$mZH] obtiveram-se as regressões: $\Sigma \overline{h}_{E,O} \approx 0.0089(\Sigma b_{E,O}) + 5.265$ com $r^2_{E,O}$=0.999, $r_{E,O}$=0.999, p<0.01, $N_{E,O}$=7 e $\Sigma \overline{h}_{CP,O} \approx 0.0098(\Sigma b_{CP,O}) + 4.732$ com $r^2_{CP,O}$=0.999, $r_{CP,O}$=0.999, p<0.01, $N_{CP,O}$=7. Antes da regularização $\Sigma \overline{h}_E = 0.0085(\Sigma b_E) + 3.525$ com r^2_E=0.999, r_E=0.999, p<0.01, N_E=7; $\Sigma \overline{h}_{CP} \approx 0.009(\Sigma b_{CP}) + 2.643$ com r^2_{CP}=0.999, p<0.01, N_{CP}=7; para o braço sul $\Sigma \overline{h}_{BS} \approx 0.006(\Sigma b_{BS}) + 5.389$ com $r^2_{BS,O}$=0.999, $r_{BS,O}$=0.999, N_{BS}=7.....157

Figura 5.2.7. Variação do parâmetro geométrico $(\Delta \overline{h} / \Delta \overline{b})_{SPBN}$ para os diferentes patamares médios da superfície livre, no sector proximal do braço norte, antes (SPBN) e depois da regularização deste troço de canal (SPBN,O).....161

Figura 5.2.8. Diagrama representativo das variações da razão largura/profundidade $(\Delta \overline{h} / \Delta \overline{b})$ ao longo dos dois canais mais importantes do estuário do Mondego. Na legenda SPemb e SDemb representaram respectivamente os sectores distal e proximal da embocadura, SDBN, SMBN, e SPBN simbolizaram os sectores distal, médio e proximal do braço norte, CRBM figurou o sector distal e proximal do troço estuarino do Canal regularizado do Baixo Mondego e SDBS, SMBS e SPBS definiram os sectores distal, médio e proximal do braço sul.....163

Figura 5.3.1.1. Variações da densidade (s_t) dos escoamentos determinadas em função da salinidade medida nos diferentes ciclos de maré aferidos nas estações: a) da Embocadura, b) da

Gala. Foram obtidas duas regressões significativas descritas respectivamente por: $s_{t,Emb}=0.7597*S_{Emb}-0.743$, com $r^2_{Emb}=0.995$, $r_{Emb}=0.998$, $p<0.01$, $N_{Emb}=956$, e por $s_{t,Gala}=0.7599*S_{Gala}-0.5946$, com $r^2_{Gala}=0.996$, $r_{Gala}=0.998$, $p<0.01$, $N_{Gala}=1445$. Nas ordenadas encontra-se projectada a densidade dos escoamentos sob a forma de sigma-t e expressa em kg/m^3, enquanto em abcissas a salinidade dos escoamentos expressa em ‰. Na legenda A_w representou a altura da maré expressa em metros e Q_r a magnitude média das descargas fluviais, expressa em m^3/s.....177

Figura 5.3.1.2. No gráfico a) encontram-se representadas as variações da densidade *versus* temperatura registadas na estação da Gala. No gráfico b) ilustram-se as variações da densidade (s_t) dos escoamentos determinadas em função da salinidade (S) medida nos diferentes ciclos de maré na estação dos Cinco Irmãos. A regressão significativa obtida neste último gráfico foi descrita por: $s_{t,5I}=0.7459*S_{5I}-0.6153$, com $r^2_{5I}=0.997$, $r_{5I}=0.998$, $p<0.01$, $N_{5I}=826$. Na legenda, A_w representou a altura da maré expressa em metros e Q_r a magnitude média das descargas fluviais, expressa em m^3/s. Nestes dois gráficos em ordenadas encontra-se projectada a densidade dos escoamentos sob a forma de sigma-t e expressa em kg/m^3, enquanto em abcissas a temperatura expressa em ºC no gráfico a) e a salinidade dos escoamentos expressa em ‰ no gráfico b).....178

Figura 5.3.1.3. Variações da densidade em função da temperatura registadas na estação Elevatória. A regressão obtida foi descrita por $s_{t,EE}=-0.004*T_{EE}+0.6073$, com $r^2_{EE}=0.991$, $r_{EE}=0.996$, $p<0.01$, $N_{EE}=433$. Na legenda A_w representou a altura da maré expressa em metros e Q_r a magnitude média das descargas do Mondego, expressa em m^3/s.....181

Figura 5.3.1.4. No diagrama a) ilustra-se a variação da temperatura *vs* salinidade para os diferentes ciclos de maré aferidos na estação da Embocadura. As linhas a cheio de fundo representam as isopícnicas de s_t expressas em kg/m^3. Na legenda A_w simbolizou a altura da maré em metros e Q_r o caudal médio expresso em m^3/s. Aquando de baixas descargas fluviais do Mondego esta estação foi ocupada fundamentalmente pela massa de água marinha. Sob descargas de maior magnitude a massa de água marinha apenas alcançou este sector distal do estuário praticamente no final da enchente, ficando nas restantes fases sob a influência da massa de água de mistura. No gráfico b) representa-se a tendência de variação registada na Embocadura entre amplitude da mistura ocorrida entre as massas de água fluvial com a marinha, designada em ordenada por "Amplitude de mistura" e expressa sob a forma de percentagem. Em abcissa o caudal médio do rio Mondego expresso em m^3/s. A regressão de potência significativa obtida foi descrita por: $y_{Emb}=0.201*(Q_{r,Emb})^{1.5684}$, com $r^2_{Emb}=0.913$, $r_{Emb}=0.956$, $p<0.05$, $N=6$.....185

Figura 5.3.1.5. Diagrama temperatura *vs* salinidade referentes aos ciclos de maré aferidos na estação dos Cinco Irmãos. Massas de água marinha, fluvial e de mistura. As linhas a cheio de fundo representam as isopícnicas de s_t expressas em kg/m^3. Na legenda A_w simbolizou a altura da maré em metros e Q_r o caudal médio expresso em m^3/s. Esta estação enquadrou-se na zona de mistura do canal principal.....186

Figura 5.3.1.6. Diagrama temperatura *vs* salinidade referente aos vários ciclos de maré aferidos na estação da Gala. Massas de água marinha, fluvial e de mistura. As linhas a cheio de fundo representam as isopícnicas de s_t expressas em kg/m^3. Na legenda A_w simbolizou a altura da maré em metros e Q_r o caudal médio expresso em m^3/s. Esta estação foi alcançada pela massa de água marinha apenas durante a preia-mar, enquadrando-se na zona de mistura do braço sul nas restantes fase da maré.....188

Figura 5.3.1.7. Frente que se formou na estação dos Cinco Irmãos durante a fase da vazante, na série 5I80893. Diferenciou dois tipos de massa de água de mistura com densidades ligeiramente diferentes. A massa de água que circulou junto à margem esquerda, de menor densidade que apresentou apenas uma espessura da ordem dos 1.2m.....194

Figura 5.3.1.8. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E100893, b) Cinco Irmãos com 5I80893, c) na Gala com G110893, referentes à campanha de campo 7-110893, no perfil central do canal, G(M). As designações PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Descreveram regimes parcialmente misturados para o canal principal e bem misturado para o braço sul.....195

Figura 5.3.1.9. Frentes que se formaram durante a fase de enchente na estação da Embocadura, na série E150392. Os esquemas a), b), c) referem-se ao princípio desta fase, e foram elaborados aquando da leitura dos perfis E21, E23 e E24 efectuados às 9h19m, 9h47m e às 10h46m, hora local. A frente formada junto ao sector norte do canal principal nesta fase resultou da não mistura entre a massa de água marinha com um fina camada de água de mistura com origem nos caudais do Mondego que circulava preferencialmente junto à margem direita em sentido de vazante. Os esquemas d), e), f) referem-se à fase terminal da enchente e foram elaborados aquando da leitura dos perfis verticais E26, E27 e E28, pelas 11h57m, 12h11m e as 12h18m, hora local, ou pelas 12.22h, 12.45h e 12.57h, hora relativa à PM de referência à análise harmónica. Nesta fase formam-se duas frentes, resultantes da confluência quer da massa de água de mistura com origem no Mondego, quer da massa de água de mistura proveniente do braço sul (ambas com sentidos de propagação de vazante) com a massa de água marinha em fase terminal da enchente.....198

Figura 5.3.1.10. Frentes registadas na estação dos Cinco Irmãos durante o ciclo de maré 5I140392. Os esquemas a), b) e c) representaram a fase final da enchente na estação dos Cinco Irmãos, enquanto o d) a fase inicial da vazante. Os perfis 5I44 e 5I48 foram obtidos no ponto de amostragem sul [5I(S)] às 11h21m e às 12h03m, hora local, ou às 12.38h e às 13.08h relativamente ao *datum* da análise harmónica. O perfil d) foi lido no ponto de amostragem sul, às 11h25m, ou às 13.45h relativamente ao *datum* da análise harmónica. A frente que se propagou ao longo do canal principal em direcção à foz apresentou uma forma em "<" e resultou da confluência entre as massas de água marinha e de mistura que se propagavam com sentidos opostos, a primeira segundo a enchente e a segunda segundo a vazante.....201

Figura 5.3.1.11. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E150392, b) Cinco Irmãos com a referência 5I140392, c) na Gala com G160392, referentes à campanha de campo 14-160392, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Descreveram quadros parcialmente misturados para o canal principal e bem misturado para o braço sul.....202

Figura 5.3.1.12. Frente que se formou durante a transição da fase final da vazante com o início da enchente no sector distal do estuário. Reflectiu à superfície, a transição do domínio marinho ZC com a zona de mistura, ZM, no canal principal. A forma em "\" que se registou no sector distal do braço norte, relacionou-se fundamentalmente com a confluência duas massas de água que se propagaram com sentidos opostos. A maré propagou-se com maior intensidade pelo sector sul do canal principal (CP) enquanto a massa de água de mistura proveniente do braço norte, propagou-se com maior intensidade pelos sectores norte e central do CP. A forma em ">" que se registou antes do braço norte, relacionou-se também com o facto de a massa de água de vazante proveniente do braço sul se ter propagado preferencialmente pelo sector sul do CP.....204

Figura 5.3.1.13. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E80392, b) Cinco Irmãos com 5I70392, c) na Gala com G50392, referentes à campanha de campo 5-80392, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Descreveram quadros parcialmente misturados (quase bem misturados) nas duas estações do canal principal e bem misturados para a estação do braço sul.....207

Figura 5.3.1.14. Frentes que se formaram no sector distal do canal principal do estuário, junto à estação da Embocadura, durante a fase da enchente e princípio da vazante. Os esquemas a), b) e c) referem-se à fase da enchente, enquanto o esquema d) à fase inicial da vazante. A frente em forma de ">" que se registou na zona da estação da Embocadura, relacionou-se com a confluência de massas de água que se propagaram com sentidos praticamente opostos. A maré propagou-se praticamente em oposição aos escoamentos de vazante provenientes do Mondego, fazendo-se a primeira sentir com maior intensidade pelo sector sul, enquanto os segundos pelo sector central e norte do canal principal. Acresceu o facto de a massa de água de vazante proveniente do braço sul se ter propagado preferencialmente pelo sector sul do CP. Esta frente reflectiu a transição entre o domínio marinho, ZC, com a zona de mistura, ZM.....210

Figura 5.3.1.15. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E190593 e b) na Gala com G200593, referentes à campanha de campo 19-220593, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar. A estação da Embocadura apresentou um quadro do tipo cunha salina, enquanto a Gala do tipo parcialmente misturado.....211

Figura 5.3.1.16. Frente registada na estação da Gala durante a fase da vazante do ciclo de maré G200593. Esta, enquadrou-se entre os pontos de amostragem G(M) e G(N), diferenciando no sector norte uma massa de água de mistura que apresentava um tempo de residência de um ou mais ciclos de maré no braço sul, da massa de água do sector sul que tinha entrado neste subsistema na anterior fase da enchente.....212

Figura 5.3.1.17. Frentes que se formaram junto à estação da Embocadura, na fase terminal da enchente e princípio da vazante. Estas frentes relacionaram-se com a confluência e não mistura à superfície da massa de água marinha com as de mistura provenientes quer do braço norte, quer do braço sul. Esta frentes resultaram de um confronto de massas de água que se propagavam com sentidos praticamente opostos. Reflectiram igualmente a transição à superfície entre o domínio marinho, ZC, e a zona de mistura, ZM.....214

Figura 5.3.1.18. Frentes que foram observadas aquando do registo da série de dados 5I40293 na estação dos Cincos Irmãos. O esquema a) refere-se à fase final da enchente, aquando da leitura do perfil vertical 5I62 determinado no ponto central do canal, 5I(M), pelas 13h46m hora local, ou às 12.25h hora relativa ao *datum* da análise harmónica. O esquema b) é relativo à fase inicial da vazante, aquando da leitura do perfil 5I67 determinado no ponto sul desta estação, 5I(S),

determinado às 15h25m locais, ou às 13.90h relativamente ao *datum* da análise harmónica. Na primeira representação a frente formada junto à extremidade do braço sul foi arrastada para montante junto à margem esquerda do canal principal (CP), enquanto no segundo esquema a frente foi arrastada para jusante da estação dos Cinco Irmãos.....218

Figura 5.3.1.19. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E70293, b) Cinco Irmãos com 5I40293, c) na Gala com G60293, referentes à campanha de campo 4-70293, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Estes diagramas definiram regimes parcialmente misturados.....217

Figura 5.3.1.20. Frente que se formou no sector distal do braço sul em resultado da confluência da massa de água de mistura em movimento de vazante junto à margem esquerda do canal principal, com a massa de água de mistura proveniente do braço sul. Apenas os primeiros dois metros superficiais da primeira massa de água sofreram um desvio para o sector mais distal do braço sul, impedindo desta forma que a massa de água superficial também em movimento de vazante do braço sul se deslocasse directamente para o sector sul do canal principal. A drenagem par ao canal principal apenas se processou na restante parte do escoamento.....220

Figura 5.3.1.21. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E111193, b) Cinco Irmãos com 5I141193, c) na Gala com a G121193, referentes à campanha de campo 11-151193, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Definiram regimes do tipo cunha salina para o canal principal e parcialmente misturado para o braço sul.....222

Figura 5.3.1.22. Frente que se formou no canal principal, na zona dos Cincos Irmãos, aquando da entrada da maré na fase inicial da enchente, em 5I51293. A massa de água em movimento segundo o sentido da enchente empurrou para montante as massas de água de mistura e fluvial que se apresentavam em fase terminal da vazante.....224

Figura 5.3.1.23. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com E81293, b) Cinco Irmãos com a referência 5I51293, c) na Gala com G91293, referentes à campanha de campo 5-91293, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-

mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Definiram regimes do tipo cunha salina para o canal principal e parcialmente misturado para o braço sul.....225
Figura 5.3.1.25. Variação da salinidade registada junto ao fundo, à superfície e na coluna de água durante os ciclos de maré aferidos na estação da Gala, no perfil central do canal, nas campanhas: a) G61291, b) G201291 e c) G60295. As designações PM e BM representam a as preia-mar e baixa-mar, enquanto as EPM e EBM a ocorrência das respectivas estofas. Definiram regimes do tipo bem misturados para o braço sul.....227
Figura 5.3.1.25. Comportamento histerético da densidade dos vários ciclos de maré registados nas estações da: a) Embocadura, b) Cinco Irmãos, c) estação Elevatória, d) Gala. Nestes quatro gráficos relacionou-se a variação da superfície livre com a densidade, expressas sob a forma da variação do nível da água relativamente ao nível médio da água com sigma-t.....231
Figura 5.3.1.26. Frentes registadas aquando do perfil longitudinal ao longo do CP, com a referência P116-P130 realizado no dia 15/08/93, no final da enchente, sob uma maré viva de $A_{w,IH}$=2.2m e baixos regimes do Mondego de $Q_{r,APC}\approx12.8m^3/s$. O esquema a) ilustra a frente registada entre os perfis P116 e P117, localizados nos pontos de amostragem Bn3 e Bn4, distantes respectivamente a 1.3km e 1.6km da foz que resultou da não mistura entre as massas de água marinha e a de mistura, com densidades diferentes, mas ambas com movimentos de enchente. O esquema b) representa a frente registada entre os pontos de amostragem Bn9 e a Bn10 (perfis P120 e P121) localizados a 5.5km e a 6.3km da foz, que esteve relacionada com uma zona de forte turbulência devido a fenómenos de convergência resultantes do estreitamento do CP causado por uma grande barra lateral. O esquema c) representou uma frente que se formou entre os perfis P121 e o P122 efectuados em Bn10.5 e Bn11 (6.7km e a 7.1km da foz) e que reflectiu a transição do domínio ZC_{CP} com a ZM_{CP}.....235
Figura 5.3.1.27. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 15/08/1993 (referência P116-P130), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. A zona de mistura descreveu valores médios de $n_{s,ZM,P116-P130}\approx0.12$ e de $R_{i,ZM,P116-P130}\approx0.67$ que definiram uma estratificação moderada e um regime parcialmente misturado, do tipo II.....236
Figura 5.3.1.28. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 6/06/1993 (referência P106-P115), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, b) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e c)

sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. A zona de mistura definiu um quadro parcialmente misturado com n_s≈0.26.....237
Figura 5.3.1.29. Frente observada entre os perfis P106 (no Bn12 a 7.5km) e o P107 (Bn13 a 8.4km) que se formou à superfície, pela não mistura entre o domínio ZC e a ZM, em que a massa de água marinha mais límpida empurrava a massa de mistura mais túrbida para montante, ambas com movimentos diferenciais de enchente.....238
Figura 5.3.1.30. Frente resultante da confluência da massa de água marinha mais límpida de enchente, com uma massa de água de mistura que se apresentava mais túrbida confinada aos 2 primeiros metros da superfície que se movimentava em sentido de vazante. Esta frente dinâmica encontrava-se localizada entre a estação Bn2 e a Bn3 (perfis P78 e P79) entre os 1km e 1.3km da foz e deslocou-se para montante ao longo do canal da embocadura com o desenrolar da fase da enchente. No esquema b) representaram-se duas frentes localizadas frente ao Cais Comercial. Entre os perfis Bn8 e Bn10 (perfis verticais P82 e P83) registou-se uma frente entre os 4.5km e os 6.3km da foz, resultante da convergência dos escoamentos de enchente.....240
Figura 5.3.1.31. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 16/05/1993 (ref.P78-P90), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) da velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) da temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.25ºC, c) da salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) e sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. Descreveu um regime de mistura e estratificação de transição do tipo II para o I, com $n_{s,P78\text{-}P90}$≈0.97 e $R_{i,P78\text{-}P90}$≈1.14.....241
Figura 5.3.1.32. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da vazante em 16/05/1993 (referência P91-P105), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. Definiu um quadro de mistura muito pequena e elevada estratificação com $n_{s,P91\text{-}P105}$≈1.52 e $R_{i,P91\text{-}P105}$≈2.68.....242
Figura 5.3.1.33. Frentes registadas aquando da realização do perfil longitudinal P91-P105 realizado no final da vazante, sob as condições hidrodinâmicas de $A_{w,IH}$=1.4m e de $Q_{r,APC}$=43.6m^3/s. No esquema a) representa-se a frente formada entre pontos de amostragem Bn2 e o Bs1 (P104 e P105), localizados a 1km e a 1.7km da foz, no sector proximal da embocadura e no sector mais distal do braço sul. Parte da massa de água proveniente do braço norte entrava parcialmente para o sector distal do braço sul. No esquema b) ilustra-se uma frente que se formou entre os perfis P99 e P100 localizados em Bn9 e Bn8, a 5.5km e a 4.5km, associada à

convergência dos escoamentos de vazante pelo estreitamento da secção molhada do braço norte.....243
Figura 5.3.1.34. Frente que se formou pela não mistura ocorrida entre a massa de água marinha em movimento de enchente que empurrava para montante a massa de água de mistura que ainda se apresentava em movimento de vazante. Esta frente às 15h42m encontrava-se localizada entre os perfis p155 (Bn2, a 1km) e o p156 (Bn3, a 1.3km) de acordo com o gráfico a), progredindo para montante. A forma em ">" desta frente no sector distal do CP relacionou-se com a confluência dos escoamentos de vazante provenientes dos braços norte e sul. Com a propagação desta frente para montante, ao longo do braço norte, ela passou a apresentar a forma "\" em resultado de uma maior propagação da enchente pelo sector sul deste canal. No sector proximal do braço norte, esta frente passou a ostentar a forma em "/" em resposta à morfologia encurvada do CP que passou a canalizar a maré para a margem direita.....244
Figura 5.3.1.35. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 1/12/1993 (referência P155-P164), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.2m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. Descreveu nesta fase final da vazante um quadro de mistura vertical e estratificação do tipo cunha salina com $n_{s,P155\text{-}P164}\approx 2.9$ e $R_{i,P155\text{-}P164}\approx 2.1$.....246
Figura 5.3.1.36. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 1/12/1993 (referência P150-P154), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.2m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.1ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. Descreveu nesta fase final da vazante um quadro de mistura vertical e estratificação do tipo cunha salina com $n_{s,P150\text{-}P154}\approx 2.9$ e $R_{i,P150\text{-}P154}\approx 0.88$.....247
Figura 5.3.1.37. Frente que se formou no sector distal do braço sul, entre as massas de água de mistura provenientes do canal principal e do braço sul durante as fase de vazante.....248
Figura 5.3.1.38. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 22/12/1993 (referência P170-P175), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. A média dos parâmetros de $n_{s,P170\text{-}P175}\approx 3.3$ e de

$R_{i,P170\text{-}P175}$≈1.8 determinou um quadro muito estratificado definido por uma mistura vertical muito pequena (tipo I).....250
Figura 5.3.1.39. Frente que foram registadas no sector distal do canal principal, ao longo do braço sul e no sector mais proximal do braço norte durante a execução do perfil longitudinal P6-P21. No esquema a) ilustra-se uma frente que se formou na parte central do canal, na estação da Embocadura, e que resultou da não mistura entre a massa de água marinha em movimento de enchente com a massa de água de mistura, menos densa, proveniente do braço norte em movimento no sentido de vazante. Esta última encontrava-se confinada ao primeiro metro de superfície e aos sectores norte e central do canal, e resultou dos fenómenos de arrastamento sofridos pelos caudais do Mondego ocorridos ao longo do braço norte. No esquema b) representou-se uma extensa frente que se estendeu longitudinalmente no braço sul, separando duas massas de água de mistura. A norte a massa de água que ficou retida aquando da BM precedente e que foi empurrada para montante e para o sector norte deste canal com a entrada da maré. Neste esquema também se apresenta a frente em forma de "<" que foi registada na estação dos Cinco Irmãos e que resultou da confluência entre a massa de água marinha em fase final de enchente com a massa de água de mistura, menos densa que se movimentava em sentido de vazante ao longo do canal principal.....253
Figura 5.3.1.40. Perfil longitudinal realizado ao longo do braço sul no final da enchente em 8/12/1991 (referência P6-P21) abrangendo parte das estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos, respectivamente localizadas nas confluências distal e proximal deste braço com o canal principal. Apresentam-se os diagramas longitudinais referentes à medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. No braço sul registou-se um quadro bem misturado com $n_{s,BS,ZM,p6\text{-}p21}$≈0.03 e com $R_{i,BS,ZM,p6\text{-}p21}$≈0.07, associando a regime dinâmico forçado pela maré.....254
Figura 5.3.1.41. Perfil longitudinal realizado ao longo do braço sul no final da enchente em 15/05/1993 (referência P60-P68), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. No braço sul registou-se um quadro parcialmente misturado com $n_{s,BS,ZM,P60\text{-}P68}$≈0.32 e com $R_{i,BS,ZM,P6\text{-}P21}$≈0.58, associando a regime dinâmico forçado pela maré.....257

Figura 5.3.1.42. Perfil longitudinal realizado ao longo do braço sul no final da vazante em 15/05/1993 (referência P69-P77), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. Definiu um quadro parcialmente misturado com $n_{s,BS,ZM,P69\text{-}P77}\approx 0.42$.....258

Figura 5.3.1.43. Frente que se formou pela não mistura entre a massa de água mais túrbida proveniente do CP com a procedente do braço sul, durante a fase de vazante. Esta frente foi observada aquando da leitura dos parâmetros físicos nos perfis verticais P77 e P76, realizados respectivamente às 16h17m e às 16h27m, hora local. Na figura assinala-se a posição dos tês perfis: P77 localizado aos 1.5km, o P76 situado aos 1.7km e o p75 localizado aos 2.4km relativamente à foz do estuário. Esta frente esteve associada a um gradiente na superfície livre gerado do canal principal para o braço sul, que foi responsável pelo desvio de uma parte da massa de água superficial de vazante proveniente do braço norte para o sector mais distal do braço sul.....259

Figura 5.3.1.44. Ilustram-se as regressões obtidas entre os alcances máximos atingidos pelos domínios marinho ($R_{ZC,PM}$) e de mistura ($R_{ZM,PM}$) aquando da PM, no canal principal (CP) e no braço sul (BS), em função das magnitudes das descargas fluviais. No gráfico a) encontram-se relacionadas as variações das magnitudes de $R_{ZC,PM}$ e de $R_{ZM,PM}$ obtidas para o canal principal e para o braço sul, com as descargas fluviais dos rios Mondego e Pranto medidas nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Gala. As regressões obtidas foram definidas por: $R_{ZC,PM,CP}=-0.0265*Q_{r,Emb}+5.5842$, com $r^2=0.84$, $r=0.92$, $p<0.05$, $N=7$ e por $R_{ZM,PM,CP}=-0.0278*Q_{r,5I}+14.236$ com $r^2=0.61$, $r=0.78$, $N=6$. No gráfico b) ilustram-se as regressões negativas obtidas quando relacionadas as magnitudes de $R_{ZC,PM}$ e de $R_{ZM,PM}$ com as descargas do Mondego medidas no Açude de Ponte em Coimbra. O domínio marinho foi representado por $R_{ZC,PM,CP}=-0.0173*Q_{r,APC}+4.6137$, com $r^2=0.78$, $r=0.88$, $p<0.05$, $N=7$ quando relacionados os valores obtidos na estação da Embocadura e por $R_{ZC,PM,PL}=-0.016*Q_{r,APC}+6.2025$, com $r^2=0.36$, $r=0.60$, $N=5$ quando relacionados os valores obtidos com a análise dos perfis longitudinais. Para a zona de mistura obteve-se a regressão $R_{ZM,PM,CP}=-0.0337*Q_{r,APC}+13.968$, com $r^2=0.70$, $r=0.84$, $N=6$ quando relacionados os valores referentes à estação dos Cinco Irmãos e por $R_{ZM,PM,PL}=-0.0173*Q_{r,APC}+4.6137$, com $r^2=0.78$, $r=0.88$, $p<0.05$, $N=7$, quando analisados os dos obtidos nos perfis longitudinais. Na legenda a designação "Gala" refere-se aos parâmetros obtidos na estação da Gala, "Emb" aos da estação da Embocadura, "5I" aos da estação dos Cinco Irmãos, "PL" aos

obtidos nos perfis longitudinais no canal principal, "PM" representou a fase da preia-mar, "ZC" o domínio marinho e "ZM" correspondeu à zona de mistura.....262
Figura 5.3.2.1. No gráfico a) ilustra-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem que definiram a estação Embocadura em E150392, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,Emb}$≈1.3m e descargas fluviais de $Q_{r,Emb}$≈37m^3/s. No gráfico b) expressam-se os caudais líquidos (expressos em m^3/s) que circularam neste ciclo de maré, pelos sectores norte (QN), central (QM), sul (QS), e pela secção transversal do canal (Q total), tendo em consideração que as respectivas secções molhadas médias foram da ordem dos 403m^2, de 464m^2 e de 464m^2. Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Q_m), o caudal médio referente às descargas fluviais (Qr) e os caudais médios referentes às fases da enchente e a vazante (Q_{mE}; Q_{mV}).....272
Figura 5.3.2.2. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem E(S), E(M) e E(N) que definiram a estação da Embocadura. No gráfico a) representam-se os perfis correspondentes à série de dados E150392. Esta série foi composta por 36 perfis que decorreram sob $A_{w,E150392}$≈1.3m e $Q_{r,E150392}$≈37m^3/s, ou sob $A_{w,IH}$=2.1m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s. No gráfico b) representam-se os perfis respeitantes à série de dados E81293, composta por 20 perfis, que decorreram sob $A_{w,IH}$≈1.6m e $Q_{r,APC}$≈82m^3/s.....276
Figura 5.3.2.3. No gráfico a) ilustra-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem da estação dos Cinco Irmãos, na série 5I140392, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,5I}$≈1.2m e descargas do Mondego de $Q_{r,5I}$≈3m^3/s. No gráfico b) expressam-se os caudais líquidos (expressos em m^3/s) que circularam neste ciclo de maré pelo sector norte (QN), central (QM), sul (QS) e que representaram secções molhadas médias de 149m^2, de 251m^2 e de 186m^2, bem como os caudais que circularam por toda a secção transversal do canal (Q total). Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Q_m), o caudal médio referente às descargas fluviais (Qr) e os caudais médios referentes às fases da enchente e a vazante (Q_{mE}; Q_{mV}).....278
Figura 5.3.2.4. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem 5I(S), 5I(M) e 5I(N) que constituem a estação dos Cinco Irmãos. No gráfico a) representam-se os perfis correspondentes à série de dados 5I140392. Esta série foi composta por 28 perfis que decorreram sob $A_{w,5I}$≈1.2m e Q_r≈3m^3/s, ou sob $A_{w,IH}$=1.6m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s. No gráfico b) representam-se os perfis respeitantes à série de dados 5I51293, composta por 25 perfis, que decorreram sob $A_{w,IH}$≈2m e $Q_{r,APC}$≈142m^3/s.....281

Figura 5.3.2.5. No gráfico a) ilustra-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem da estação Elevatória de EE220593, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,EE}$≈1.8m e descargas do Mondego de $Q_{r,EE}$≈67m^3/s, ou sob $A_{w,IH}$≈2m e $Q_{r,APC}$≈14m^3/s. No gráfico b) expressam-se os caudais líquidos (expressos em m^3/s) que circularam neste ciclo de maré pelos sectores norte (QN), central (QM), sul (QS) que apresentaram secções molhadas médias respectivamente de 234m^2, de 260m^2 e de 210m^2, bem como os caudais que circularam por toda a secção transversal do canal (Q total). Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Q_m), o caudal médio referente às descargas fluviais (Q_r) e os caudais médios referentes às fases da enchente e a vazante (Q_{mE}; Q_{mV}).....286

Figura 5.3.2.6. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem EE(S), EE(M) e EE(N) da estação Elevatória. No gráfico a) expressam-se os perfis referentes à série de dados EE220593 que decorreu sob $A_{w,EE220593}$=1.8m e $Q_{r,EE220593}$=67m^3/s; ou sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=14m^3/s. No gráfico b) representam-se os perfis referentes à série de dados EE151193 que representaram condições de $A_{w,EE151193}$=1.5m e $Q_{r,EE151193}$=160m^3/s ou sob $A_{w,IH}$= 3.3m e $Q_{r,APC}$=98m^3/s.....288

Figura 5.3.2.7. No gráfico a) representa-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem que definiram a estação Gala em G200593, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,Gala}$≈2m e descargas do Pranto de $Q_{r,Gala}$≈11m^3/s. No gráfico b) ilustram-se os caudais líquidos (expressos m^3/s) que circularam neste ciclo de maré pelo sector norte (QN), central (QM), sul (QS) que apresentaram secções molhadas médias respectivamente de 202m^2, de 164m^2 e de 193m^2, bem como os caudais que circularam por toda a secção transversal do canal (Q total). Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Q_m), o caudal médio referente às descargas fluviais (Qr) e os caudais médios referentes às fases da enchente e da vazante (Q_{mE}; Q_{mV}).....290

Figura 5.3.2.8. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem G(S), G(M) e G(N) que compuseram a estação da Gala. No gráfico a) expressam-se os 31 perfis que compuseram a série de dados G200593 que decorreu sob $A_{w,G200593}$=2m e $Q_{r,G200593}$=11m^3/s, ou sob $A_{w,IH}$=2.3m e $Q_{r,APC}$=7m^3/s. No gráfico b) representam-se os 27 perfis correspondentes à série de dados G91293 que representaram condições de $A_{w,G91293}$=1.7m e de $Q_{r,G91293}$=20m^3/s, ou de $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s.....294

Figura 5.3.2.9. Tendências de variação definidas entre o número Reynolds (R_e) e a velocidade média (u) dos diversos perfis de velocidade longitudinal medidos da coluna de água, nas quatro

estações do estuário. Os resultados obtidos na estação da Embocadura foram referenciados na legenda por "Emb", nos cinco Irmãos por "5I", na estação Elevatória por "EE" e na Gala por "Gala". Verificou-se que em todo o estuário foram registados apenas regimes turbulentos, definidos por magnitudes de R_e tendencialmente mais elevadas sob escoamentos com maior velocidade. Com o aumento da velocidade os escoamentos tornam-se cada vez mais turbulentos.....296

Figura 5.3.2.10. Tendências de variação definidas entre a velocidade de corte de fundo (u_*) e a velocidade média (u) dos vários perfis de velocidade integrados na coluna de água, registadas nas quatros estações do estuário do Mondego. As variações da velocidade de corte nas diversa estações foram definidas pelas seguintes regressões: na Embocadura por $(u_{*,Emb})^2=0.0046*(\overline{u}_{Emb})^2$, r=0.90, r^2=0.81, p<0.01, N_{Emb}=206, na Elevatória por $(u_{*,EE})^2=0.0037*(\overline{u}_{EE})^2$, r=0.92, r^2=0.95, p<0.01, N_{EE}=175. Sob descargas do Mondego elevadas na fase de vazante passou a ser definida por $(u_{*,EE,Qr>100m3/s})^2=0.0071*(\overline{u}_{EE})^2$, r=0.88, r^2=0.94, p<0.01, N_{EE}=24. Na Gala, para a enchente por $(u_{*,Gala})^2=0.0063*(\overline{u}_{Gala})^2$, r=0.80, r^2=0.64, p<0.01, N_{Gala}=130, e para a vazante por $(u_{*,Gala})^2=0.0048*(\overline{u}_{Gala})^2$, r=0.65, r^2=0.42, p<0.01, N_{Gala}=174. Na estação dos Cinco Irmãos para a fase da enchente: $(u_{*e,5I})^2=0.0053*(\overline{u}_{5I})^2$, r=0.91, r^2=0.82, p<0.01, $N_{5I,e}$=100. Enquanto para a fase da vazante sob descargas do Mondego baixas por: $(u_{*,5I,v,Qr<109m3/s})^2=0.0212*(\overline{u}_{5I})^2$, r=0.82, r^2=0.91, p<0.01, $N_{5I,Qr<109m3/s}$=39. Sob descargas mais elevadas foi descrita por: $(u_{*,5I,v,Qr>109m3/s})^2=0.0032*(\overline{u}_{5I})^2$, r=0.59, r^2=0.77, p<0.01, $N_{5I,Qr>109m3/s}$=75. As regressões obtidas definiram tensões de corte de fundo tendencialmente mais elevadas sob escoamentos de maior velocidade.....299

Figura 5.3.3.1. Erros cometidos com a aplicação da análise harmónica aos dados maregráficos de campo linearmente interpolados (Rss): a) tendências de variação registadas entre os erros cometidos relativos à variação da superfície livre (Rss_h) e a amplitude da maré; b) tendências de variação registadas entre Rss_h e os caudais fluviais médios (Q_r); c) relação entre os erros cometidos relativos à componente horizontal (Rss_u) e a altura da maré; d) relação entre Rss_u e Q_r.....304

Figura 5.3.3.2. Tendências de variação definidas ente os períodos de enchente (P_e) e os principais agentes hidrodinâmicos em estudo, para as diferentes estações do estuário. No gráfico a) relacionaram-se os P_e com a altura da maré (A_w). Foram definidas as seguintes regressões: $P_{e,Emb,Qr\leq155m3/s}$= -0.7652*$A_{w,Emb}$+6.731 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.76, p<0.05, N_{Emb}=6; $P_{e,Emb,Qr\leq37m3/s}$= -0.2358*$A_{w,Emb}$+6.2411 com $r^2_{Emb,Qr\leq37m}3_{/s}$=0.99, p<0.05, N_{Emb}=3; $P_{e,5I,Qr\leq142m3/s}$= -1.3059*$A_{w,5I}$+7.0933 com $r^2_{5I,Aw}$=0.85, p<0.05, N_{5I}=6; $P_{e,Gala,Qr\leq42m3/s}$=-0.2203*$A_{w,Gala}$+6.1147 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.19, $r_{Gala,Aw}$=-

0.44, N_{Gala}=10. No gráfico b) relacionaram-se os P_e com as descargas fluviais (Q_r). Definiram-se as seguintes regressões: $P_{e,Emb,Qr\leq155m3/s}$=-0.01*$Q_{r,Emb}$+6.2282 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.98, $r_{Emb,Aw}$=-0.989, p<0.01, N_{Emb}=6; $P_{e,5I,Qr\leq142m3/s}$=-0.0106*$Q_{r,5I}$+5.6967 com $r^2_{5I,Aw}$=0.85, p<0.05, N_{5I}=6; $P_{e,EE,Qr\leq155m3/s}$=-0.0136*$Q_{r,5I}$+5.3466 com $r^2_{5I,Aw}$=0.99, $r_{5I,Aw}$=-0.995, p<0.05, N_{5I}=3. Na legenda, $P_{e,Emb}$, $P_{e,Gala}$, $P_{e,5I}$ e $P_{e,EE}$ representaram os períodos de enchente aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória, enquanto $P_{e,Emb,Qr\leq37m3/s}$ e $P_{e,5I,Qr\leq43m3/s}$ referem-se aos ciclos de maré regidos por caudais fluviais inferiores a 37m^3/s e a 43m^3/s, respectivamente. Os períodos de enchente tenderem a ser mais curtos, quer sob marés de maior amplitude, quer sob maiores descargas fluviais. Os testes de Durbin-Watson 1.6<t_{DW}<2.5 aludiram para a independência destas variáveis.....306

Figura 5.3.3.3. Tendências de variação definidas ente os períodos de vazante (P_v) e os principais agentes hidrodinâmicos em estudo, para as quatro estações do estuário. No gráfico a) relacionaram-se os P_v com a altura da maré (A_w), tendo-se obtido as seguintes regressões: $P_{v,Emb,Qr\leq155m3/s}$=0.7278*$A_{w,Emb}$+5.7677, com $r^2_{Emb,Aw}$=0.74, $r_{Emb,Aw}$=0.86, p<0.05, N_{Emb}=6; $P_{v,Emb,37<Qr\leq155m3/s}$= 0.3533*$A_{w,Emb}$+6.7118, com $r^2_{Emb,Aw}$=0.80, $r_{Emb,Aw}$=0.89, N_{Emb}=3; $P_{v,5I,Qr\leq142m3/s}$= 1.2539*$A_{w,5I}$+5.3958, com $r^2_{5I,Aw}$=0.78, $r_{5I,Aw}$=0.88, p<0.05, N_{5I}=6; $P_{v,5I,43<Qr\leq142m3/s}$= 0.8599*$A_{w,5I}$+6.2947, com $r^2_{5I,Aw}$=0.998, $r_{5I,Aw}$=0.999, p<0.05, N_{5I}=4; $P_{v,5I,Qr\leq43m3/s}$= 1.1487*$A_{w,5I}$+5.3377, com $r^2_{5I,Aw}$=0.82, $r_{5I,Aw}$=0.91, N_{5I}=3; $P_{v,EE,Qr\leq160m3/s}$=0.9859*$A_{w,EE}$+6.7427, com $r^2_{5I,Aw}$=0.10, N_{EE}=3; $P_{v,Gala,Qr\leq46m3/s}$= 0.2613*$A_{w,gala}$+6.2947, com $r^2_{Gala,Aw}$=0.26, $r_{Gala,Aw}$=0.51, N_{Gala}=10. No gráfico b) projectaram-se as regressões definidas entre P_v e as magnitudes dos caudais fluviais (Q_r), tendo-se obtido as seguintes regressões: $P_{v,Emb}$= 0.0097*$Q_{r,Emb}$+6.2335, para $r^2_{Emb,Qr}$=0.98, $r_{Emb,Qr}$=0.99, p<0.05, N_{Emb}=6; $P_{v,5I}$= 0.0107*$Q_{r,5I}$+6.7028, para $r^2_{5I,Qr}$=0.87, $r_{5I,Qr}$=0.93, p<0.05, N_{5I}=6; $P_{v,EE}$=0.0134*$Q_{r,EE}$+7.0914, para $r^2_{EE,Qr}$= 0.99, $r_{EE,Qr}$=0.99, p<0.05, N_{EE}=3. Na legenda, Emb, Gala, 5I e EE representaram os períodos aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória considerando todos os ciclos de maré estudados, enquanto Emb,Q_r<37m^3/s e 5I,Q_r<43m^3/s representaram apenas os ciclos de maré regidos por caudais fluviais inferiores a 37m^3/s e a 43m^3/s, respectivamente. Os períodos de vazante tenderam a ser mais elevados, quer sob marés de maior amplitude, quer descargas fluviais.....309

Figura 5.3.3.4. Tendências de variação definidas entre as magnitudes das velocidades máximas da enchente ($u_{max,e}$) e a variação das magnitudes dos principais agentes hidrodinâmicos, nas quatro estações do estuário. No gráfico a) relacionou-se $u_{max,e}$ com a altura da maré (A_w), tendo sido definidas as seguintes regressões: $u_{max,e,Emb,Qr\leq92m3/s}$= 0.2344*$A_{w,Emb}$+0.0944 com $r^2_{Emb,Aw,Qr\leq92m3/s}$=0.96, $r_{Emb,Aw,Qr\leq92m3/s}$=0.98, p<0.05, $N_{Emb,Qr\leq92m3/s}$=4; $u_{max,e,Emb,Qr\geq92m3/s}$=

0.0156*$A_{w,Emb}$+0.4447 com $r^2_{Emb,Aw,Qr\geq92m3/s}$=0.66, $r_{Emb,Aw,Qr\leq92m3/s}$=0.82, $N_{Emb,Qr\geq92m3/s}$=3; $u_{max,e,5I,Qr\leq50m3/s}$ =0.1992*$A_{w,5I}$-0.0036 com $r^2_{5I,Aw,Qr\leq50m3/s}$=0.83, $r_{5I,Aw,Qr\leq50m3/s}$=0.91, $N_{5I,Qr\leq50m3/s}$=4; $u_{max,e,5I,Qr\geq109m3/s}$ =-0.0464*$A_{w,5I}$-0.2403 com $r^2_{5I,Aw,Qr\geq109m3/s}$=0.06, $r_{5I,Aw,Qr\leq50m3/s}$=0.23, $N_{5I,Qr\leq50m3/s}$=3; $u_{max,e,Gala,Qr\leq46m3/s}$ =0.2*$A_{w,Gala}$-0.0036 com $r^2_{Gala,Aw,Qr\leq46m3/s}$=0.83, $r_{Gala,Aw,Qr\leq46m3/s}$=0.96, p<0.01, $N_{Gala,Qr\leq46m3/s}$=10. No gráfico b) relacionou-se $\bar{u}_{max.e}$ com a magnitude das descargas fluviais (Q_r), tendo-se obtido as seguintes regressões: $u_{max,e,Emb,Qr\leq155m3/s}$= 3x$10^{-6}$*$Q_{r,Emb}{}^2$-0.0003*$Q_{r,Emb}$-0.414 com $r^2_{Emb,Qr}$=0.93, $r_{Emb,Qr}$=-0.97, p<0.05, N_{Emb}=5; $u_{max,e,5I,Qr\leq142m3/s}$ =0.0007*$Q_{r,5I}$-0.4025 com $r^2_{5I,Qr}$=0.18, $r_{5I,Qr}$=-0.42 N_{5I}=6; $u_{max,e,EE,Qr\leq160m3/s}$ =0.0001*$Q_{r,EE}$-0.4732 com $r^2_{EE,Qr}$=0.54, $r_{EE,Qr}$=-0.74, N_{EE}=3. Na legenda, "Emb,$Q_r\leq92m^3/s$", "5I,$Q_r\leq50m^3/s$" e "EE,$Q_r\leq67m^3/s$" representaram os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais inferiores a $92m^3/s$, a $50m^3/s$ e a $67m^3/s$ nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. "Emb(BN)" representou o ciclo de maré aferido na secção transversal localizada na extremidade distal do braço norte, 100m a montante da secção transversal do canal denominada de Embocadura.....313

Figura 5.3.3.5. Tendências de variação definidas entre as ocorrências das magnitudes máximas das velocidades da enchente adimensional ($t_{umax,e}$) e os principais agentes hidrodinâmicos em análise, para as diferentes estações do estuário: No gráfico a) relaciona-se $t_{umax,e}$ com a altura da maré (A_w) , tendo-se obtido as seguintes regressões: $t_{umax,e,Emb}$=0.0499*$A_{w,Emb}$+0.438, com $r^2_{Emb,Aw}$=0.93, $r_{Emb,Aw}$=0.96, p<0.01, N_{Emb}=6; $t_{umax,e,Gala}$=0.0561*$A_{w,Gala}$ + 0.4612, com $r^2_{Gala,Aw}$=0.67, $r_{Gala,Aw}$=0.82, p<0.01, N_{5I}=10; $t_{umax,e,5I}$=-0.0389 * $A_{w,5I}$ + 0.5901, com $r^2_{5I,Aw}$=0.72, $r_{5I,Aw}$=-0.85, p<0.05, N_{5I}=6. No gráfico b) relaciona-se $t_{umax,e}$ com os caudais fluviais (Q_r), tendo sido definidas as seguintes equações de regressão: $t_{umax,e,Emb}$=0.0005*$A_{w,Emb}$+0.4859, com $r^2_{Emb,Qr}$=0.58, $r_{Emb,Qr}$=-0.76, N_{Emb}=6; $t_{umax,e,5I}$=-0.0003*$A_{w,5I}$+0.5898, com $r^2_{5I,Qr}$=0.82, $r_{5I,Qr}$=-0.90, p<0.05, N_{5I}=6; $t_{umax,e,EE}$=0.0003*$A_{w,EE}$+0.5448, com $r^2_{EE,Qr}$=0.89, $r_{5I,Qr}$=-0.94, N_{emb}=6. Na legenda, "Emb", "Gala", "5I" e "EE" representaram os resultados obtidos para todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória.....316

Figura 5.3.3.6. Tendências de variação definidas entre as magnitudes máximas das velocidades da vazante ($u_{max,v}$) e os principais agentes hidrodinâmicos em análise, nas quatro estações do estuário. No gráfico a) relaciona-se $\bar{u}_{max.v}$ com a altura da maré (A_w), tendo-se definido as seguintes regressões: $u_{max,v,Emb,Qr\leq92m3/s}$=0.2265*$A_{w,Emb}$+0.1548, com $r^2_{Emb,Qr\leq92m}3_{/s}$=0.85, $r_{Emb,Qr\leq92m}3_{/s}$=0.95, p<0.05, $N_{Emb,Qr\leq92m}3_{/s}$=4; $u_{max,v,Emb,Qr\leq155m3/s}$=0.1592*$A_{w,Emb}$+0.237, com $r^2_{Emb,Aw}$=0.95, $r_{Emb,Aw}$=0.97, p<0.01, N_{Emb}=6; $u_{max,v,5I,Qr\leq142m3/s}$=0.1045*$A_{w,5I}$+0.2608, com $r^2_{5I,Aw}$=0.32, $r_{5I,Aw}$=0.56, N_{5I}=6; $u_{max,v,5I,Qr<50m3/s}$=0.2883*$A_{w,5I}$+0.0294, com $r^2_{5I,Aw}$=0.76, $r_{5I,Aw}$=0.87, N_{5I}=4; $u_{max,v,EE,Qr<160m3/s}$=0.2145*$A_{w,EE}$+0.1573, com $r^2_{EE,Aw}$=0.45, $r_{EE,Aw}$=0.67, N_{EE}=3;

$u_{max,v,Gala,Qr\leq46m3/s}$=0.1998*$A_{w,Gala}$+0.091, com $r^2_{Gala,Aw}$=0.65, $r_{Gala,Aw}$=0.81, p<0.05, N_{Gala}=10. No gráfico b) relaciona-se $\bar{u}_{max.v}$ com as descargas fluviais (Q_r), definindo-se as seguintes regressões: $u_{max,v,Emb,Qr\leq155m3/s}$=0.0014*$Q_{r,Emb}$+0.3913, com $r^2_{Emb,Qr}$=0.58, $r_{Emb,Qr}$=0.76, N_{Emb}=6; $u_{max,v,EE,Qr\leq160m3/s}$=0.0012*$Q_{r,EE}$+0.3801, com $r^2_{EE,Qr}$=0.77, $r_{EE,Qr}$=0.88, N_{EE}=3; $u_{max,v,Gala,Qr\leq46m3/s}$=0.0044*$Q_{r,Gala}$+0.3411, com $r^2_{Gala,Qr}$=0.31, $r_{Gala,Qr}$=0.56, N_{Gala}=10. Na legenda, "Emb", "Gala", "5I" e "EE" representaram os resultados obtidos para todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória.....319

Figura 5.3.3.7. Tendências de variação definidas entre as ocorrências das velocidades máximas na vazante adimensional (t_{umax}) e os principais agentes hidrodinâmicos, nas quatro estações do estuário. No gráfico a) relaciona-se t_{umax} com a altura da maré (A_w), tendo-se definido as seguintes regressões: $t_{umax,v,Emb}$=-0.0508*$A_{w,Emb}$+0.5096 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.53, $r_{Emb,Aw}$=-0.73, N_{Emb}=6; $t_{umax,v,Gala}$=-0.0934*$A_{w,Gala}$+0.5871 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.71, $r_{Gala,Aw}$=-0.84, p<0.05, N_{Gala}=10; $t_{umax,v,5I}$=-0.217*$A_{w,5I}$+0.1243 com $r^2_{5I,Aw}$=0.59, $r_{5I,Aw}$=0.77, N_{5I}=6. No gráfico b) Tendências de variação de t_{umax} com as descargas fluviais (Q_r), obtendo-se obtido as regressões: $t_{umax,v,Emb}$=-0.0006*$Q_{r,Emb}$+0.4729 com $r^2_{Emb,Qr}$=0.60, $r_{Emb,Qr}$=-0.78, N_{Emb}=6; $t_{umax,v,5I}$=0.0012*$Q_{r,5i}$+0.3895 com $r^2_{5I,Qr}$=0.60, $r_{5I,Qr}$=0.54, N_{5I}=6; $t_{umax,v,EE}$=0.0031*$Q_{r,EE}$+0.1859 com $r^2_{EE,Qr}$=0.84, $r_{EE,Qr}$=0.92, N_{EE}=3. Na legenda, "Emb", "Gala", "5I" e "EE" representaram os resultados obtidos para todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória.....321

Figura 5.3.3.8. Tendências definidas ente a variação da velocidade média (a_u) e as magnitudes dos agentes hidrodinâmicos em análise. No gráfico a) relaciona-se a_u com a amplitude da maré (A_w), obtendo-se as seguintes regressões: $a_{u,Emb,Qr\leq92m3/s}$=0.5291*Ln($A_{w,Emb}$)+0.7171, com $r^2_{Emb,Aw}$=0.95, $r_{Emb,Aw}$=0.97, p<0.05, N_{Emb}=4; $a_{u,Emb,Qr\leq155m3/s}$=0.3404*Ln($A_{w,Emb}$)+0.7483, com $r^2_{Emb,Aw}$=0.90, $r_{Emb,Aw}$=0.95, p<0.01, N_{Emb}=6; $a_{u,5I,Qr\leq50m3/s}$=0.7203*Ln($A_{w,5I}$)+0.5932, com $r^2_{5I,Aw,Qr\leq50m}3_{/s}$=0.80, $r_{5I,Aw,Qr\leq50m}3_{/s}$=0.86, $N_{5I,Qr\leq50m}3_{/s}$=4; $a_{u,Gala,Qr\leq46m3/s}$= 0.6375*Ln($A_{w,Gala}$)+0.4562, com $r^2_{Gala,Aw}$=0.87, $r_{Gala,Aw}$=0.93, p<0.01, N_{Gala}=10; $a_{u,5I,Qr\leq160m3/s}$=0.2116*Ln($A_{w,5I}$)+0.6974, com $r^2_{5I,Aw,Qr\leq160m}3_{/s}$=0.18, $r_{5I,Aw,Qr\leq160m}3_{/s}$=0.45, $N_{5I,Qr\leq50m}3_{/s}$=6; $a_{u,EE,Qr\leq142m3/s}$=0.5482*Ln($A_{w,EE}$)+0.6471, com $r^2_{EE,aw}$=0.98, $r_{EE,aw}$=0.992, N_{EE}=3. No gráfico b) relaciona-se a_u com os caudais fluviais (Q_r), definindo-se apenas a regressão $a_{u,Emb,Qr\leq155m3/s}$=0.1211*Ln($A_{w,Emb}$)+0.4047, com $r^2_{Emb,Qr\leq155m}3_{/s}$=0.49, $r_{Emb,Qr\leq155m}3_{/s}$=0.70, $N_{Emb,Qr\leq155m}3_{/s}$=6. Na legenda, "Emb,$Q_r\leq92m^3/s$" e "5I,$Q_r\leq50m^3/s$" representaram os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais inferiores a $92m^3/s$ e a $50m^3/s$ nas estações da Embocadura e Cinco Irmãos.....324

Figura 5.3.3.9. Tendências de variação definidas entre as magnitudes máximas das velocidades da enchente e da vazante com a variação do parâmetro $(U_{rms})^3$. No gráfico a) relaciona-se a fase da enchente, tendo-se definido as seguintes regressões: $u_{max,e,Emb,Qr\leq92m3/s}=-5.8565*[U_{rms,Emb}]^3-0.2329$, com $r^2_{Emb,Urms,Qr\leq92m3/s}=0.99$, $r_{Emb,Urms,Qr\leq92m3/s}=0.996$, $p<0.05$, $N_{Emb,Qr\leq92m3/s}=4$; $u_{max,e,5I,Qr\leq50m3/s}=-3.6673*[U_{rms,5I}]^3-0.2857$, com $r^2_{5I,Urms,Qr\leq50m3/s}=0.98$, $r_{5I,Urms,Qr\leq50m3/s}=0.988$, $p<0.05$, $N_{5I,Qr\leq50m3/s}=4$; $u_{max,e,Gala,Qr\leq46m3/s}=-5.4207*[U_{rms,Gala}]^3-0.2088$, com $r^2_{Gala,Urms,,Qr\leq46m3/s}=0.68$, $r_{Gala,Urms,,Qr\leq46m3/s}=0.83$, $p<0.01$, $N_{Gala,Qr\leq46m3/s}=10$. No gráfico b) relaciona-se na fase da vazante, tendo-se obtido as seguintes regressões: $u_{max,v,Emb,Qr\leq155m3/s}=-5.8565*[U_{rms,Emb}]^3-0.2329$, com $r^2_{EMB,Urms}=0.96$, $r_{Emb,Urms}=0.98$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $u_{max,V,5I,Qr\leq142m3/s}=-3.6673*[U_{rms,5I}]^3-0.2857$, com $r^2_{5IB,Urms}=0.82$, $r_{5I,Urms}=0.90$, $p<0.01$, $N_{5I}=6$; $u_{max,V,Gala,Qr\leq42m3/s}=-5.4207*[U_{rms,Gala}]^3-0.2088$, com $r^2_{EMB,Urms}=0.86$, $r_{Gala,Urms}=0.93$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; $u_{max,V,EE,Qr\leq160m3/s}=-5.162*[U_{rms,5I}]^3-0.293$, com $r^2_{EE,Urms}=0.96$, $r_{EE,Urms}=0.98$, $N_{EE}=3$. Na legenda, "Emb(BN)" representou o ciclo de maré, deslocado 100m para montante realizado no início do braço norte. Relações ocorridas entre as magnitudes das velocidades máximas da enchente e da vazante com a variação do parâmetro $(U_{rms})^3$. Na legenda, "Emb(BN)" representou o ciclo de maré, deslocado 100m para montante realizado no início do braço norte.....330

Figura 5.3.3.10. No gráfico a) definem-se as tendência de variação obtidas entre a amplitude da velocidade média (a_u) com o parâmetro $(U_{rms})^3$. Foram obtidas as seguintes regressões: $a_{u,Emb}=0.2528*\ln((U_{rms,Emb})^3)+1.7692$ com $r^2_{Emb,Urms}=0.98$, $r_{Emb,Urms}=0.99$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $a_{u,Gala}=0.206*\ln((U_{rms,Gala})^3)+1.6048$ com $r^2_{Gala,Urms}=0.91$, $r_{Gala,Urms}=0.96$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; $a_{u,5I}=0.2353*\ln((U_{rms,5I})^3)+1.6769$ com $r^2_{5I,Urms}=0.88$, $r_{5I,Urms}=0.94$, $p<0.01$, $N_{5I}=6$; $a_{u,EE}=0.1095*\ln((U_{rms,5I})^3)+1.2348$ com $r^2_{EE,Urms}=0.31$, $r_{EE,Urms}=0.56$, $N_{EE}=3$. No gráfico b) projectam-se as regressões ocorridas entre a variação de $(U_{rms})^3$ e a altura da maré, tendo-se definido as seguintes equações de regressão: $[U_{rms,Emb}]^3=0.039*\ln(A_{w,Emb})+0.0182$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.98$, $r_{Emb,Aw}=0.99$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$ (para $0.9\leq A_{w,Emb}\leq2.6$m e $Q_{r,Emb}\leq155m^3/s$); $[U_{rms,5I}]^3=0.0301*\ln(A_{w,5I})+0.0129$, com $r^2_{5I,Aw}=0.35$, $r_{5I,Aw}=0.59$, $p>0.05$, $N_{5I}=6$; $[U_{rms,EE}]^3=0.0566*\ln(A_{w,EE})+0.0174$, com $r_{EE,Aw}=0.30$, $r_{EE,Aw}=0.55$, $N_{EE}=3$; $[U_{rms,Gala}]^3=0.0357*\ln(A_{w,Gala})+0.0069$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.52$, $r_{Gala,Aw}=0.72$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$ (para $0.9\leq A_{w,Gala}\leq2.6$m e $Q_{r,Gala}\leq46m^3/s$). Na legenda, "Emb.", "Gala", "5I." e "EE." representaram os resultados obtidos em todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória. Estas variáveis foram consideradas independentes com $1.5<t_{DW}<2.4$. Foram definidas tendências de variação directas e proporcionais entre estas variáveis.....332

Figura 5.3.4.1. Tendências de variação definidas entre os volumes de vazante (V_v) e os principais agentes hidrodinâmicos, nas diferentes estações do estuário. No gráfico a) relaciona-se V_v com as descargas fluviais (Q_r), enquanto no gráfico b) confronta-se V_v com a variação da altura da maré (A_w). Na legenda $V_{v,Emb}$, $V_{v,5I}$, $V_{v,Gala}$ e $V_{v,EE}$ representaram os volumes de vazante registados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos, Gala e estação Elevatória. Dos resultados obtidos, destaca-se que os volumes de vazante registados nas diferentes estações apresentaram variações directas e proporcionais às variações de A_w e de Q_r. As regressões múltiplas obtidas entre V_v com Q_r e com A_w nas diferentes estações foram descritas por: $V_{v,Emb}=1.0x10^7+1246072*A_{w,Emb}+32845.75*Q_{r,Emb}$, com $r_{Aw,Qr,Emb}=0.79$, $r^2_{Aw,Qr,Emb}=0.63$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Emb}=1.92$, $p<0.10$, $N_{Emb}=6$; por $V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=-79388.9+1450487*A_{w,Gala}+50156.734*Q_{r,Gala}$, com $r_{Aw,Qr,Gala}=0.95$, $r^2_{Aw,Qr,Gala}=0.90$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Gala}=1.7$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; $V_{v,5I}=1412015+1902626*A_{w,5I}+19299{,}48*Q_{r,5I}$, com $r_{Aw,Qr,5I}=0.93$, $r^2_{Aw,Qr,5I}=0.869$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,5I}=1.3$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$. Os testes de Durbin-Watson atestaram a independência destas variáveis ($1.8\leq t_{DW}\leq 2.4$). A regressões simples definidas no gráfico a) foram descritas por: $V_{v,Emb}=31621+Q_{r,Emb}+7.79x10^6$, $r^2_{Qr,Emb}=0.88$, $r_{Qr,Emb}=0.94$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=51950+Q_{r,Gala}+2.42x10^6$, $r^2_{Qr,Gala}=0.50$, $r_{Qr,Gala}=0.71$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$; $V_{v,5I}=31842+Q_{r,5I}+3.63x10^6$, $r^2_{Qr,5I}=0.81$, $r_{Qr,5I}=0.90$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$ e por $V_{v,EE}=34236+Q_{r,EE}+3.6x10^6$, $r^2_{Qr,EE}=0.95$, $r_{Qr,EE}=0.97$, $N_{EE}=3$, enquanto no gráfico b) por: $V_{v,Emb}=2.42x10^6+A_{w,Emb}+6.19x10^6$, $r^2_{Aw,Emb}=0.69$, $r_{Aw,Emb}=0.83$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; $V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=1.53x10^6+A_{w,Gala}+9.19x10^6$; $r^2_{Aw,Gala}=0.44$, $r_{Aw,Gala}=0.66$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$ e por $V_{v,5I}=3.84x10^6+A_{w,5I}–4.27x10^5$; $r^2_{Aw,5I}=0.77$, $r_{Aw,5I}=0.88$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$.....335

Figura 5.3.4.2. Regressões entre os volumes de enchente ($V_{e,PM}$) e a variação da altura da maré (A_w) para as diferentes estações estudadas no estuário. Foram definidas pelas seguintes equações: $V_{e,PM,Emb,Qr\leq 37m3/s}=3.17x10^6*A_{w,Emb}+3.48x10^6$, com $r_{Aw,Emb}=0.997$, $r^2_{Aw,Emb}=0.99$, $p<0.05$, $N_{Emb}=3$; $V_{e,PM,Emb,92\leq Qr\leq 155m3/s}=-8.24x10^5*A_{w,Emb}+7.8x10^6$, com $r_{Aw,Emb}=0.98$, $r^2_{Aw,Emb}=0.96$, $N_{Emb}=3$; $V_{e,PM,5I,Qr\leq 43m3/s}=1.63x10^6*A_{w,5I}+9.17x10^5$, com $r_{Aw,5I}=0.985$, $r^2_{Aw,5I}=0.97$, $N_{5I}=3$; $V_{e,PM,Gala,Qr\leq 46m3/s}\approx V_{e,BS}=1.47x10^6*A_{w,Gala}+7606$, com $r_{Aw,Gala}=0.896$, $r^2_{Aw,Gala}=0.80$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$. Estas regressões definiram testes de Durbin-Watson fundamentaram a independência das variáveis, com $1.9\leq t_{DW}\leq 2.3$. Os volumes de enchente tenderam a aumentar proporcionalmente com a altura da maré e inversamente com o aumento das descargas fluviais.....337

Figura 5.3.4.3. Variação dos volumes de enchente ($V_{e,PM}$) em circulação nas diferentes estações do estuário: a) regressões obtidas entre $V_{e,PM}$ e A_w; b) regressões obtidas entre $V_{e,PM}$ e Q_r. As

regressões obtidas foram definidas por $V_{e,PM,Emb,Qr\leq155m3/s}$=-1.28x10^4*$Q_{r,Emb}$+7.7x10^6, com $r_{Qr,Emb}$=0.73, $r^2_{Qr,Emb}$=0.53, N_{Emb}=6 e por $V_{e,PM,EE,Qr\leq160m3/s}$=-1.06x10^4*$Q_{r,EE}$+3.6x10^6, com $r_{Qr,EE}$=0.78, $r^2_{Qr,Emb}$=0.61, N_{EE}=3. Os testes de Durbin-Watson atestaram a independência destas variáveis, com $1.8\leq t_{DW}\leq2.4$. Os volumes de enchente tenderam a decrescer de uma forma proporcional com o aumento da magnitude das descargas fluviais.....339

Figura 5.3.4.4. Correlações obtidas entre os volumes de enchente referentes à secção molhada da BM ($V_{e,BM}$) e a variação da altura da maré nas quatro estações do estuário. Foram definidas por: $V_{e,BM,Emb,Qr\leq37m3/s}$=2.22x10^6*$A_{w,Emb}$+3.79x10^6, com $r_{Aw,Emb}$=0.99, $r^2_{Aw,Emb}$=0.99, p<0.05, N_{Emb}=3; por $V_{e,BM,Gala,Qr\leq46m3/s}$=$V_{e,BS}$≈541934*$A_{w,Gala}$+674907, com $r_{Aw,Gala}$=0.65, $r^2_{Aw,Emb}$=0.42, p<0.01, N_{Emb}=10; por $V_{e,BM,Emb,92\leq Qr\leq155m3/s}$=-1.45x10^6*$A_{w,Emb}$+7.94x10^6 , com $r_{Aw,Emb}$=0.98, $r^2_{Aw,Emb}$=0.96, N_{Emb}=3; e por $V_{e,BM,CP,Qr\leq37m3/s}$=1.68x10^6*$A_{w,Emb}$+3.12x10^6. As regressões apresentaram testes de Durbin-Watson de $1.9\leq t_{DW}\leq2.3$ que afirmaram a independência destas variáveis.....342

Figura 5.3.4.5. Regressões obtidas entre os prismas de maré (**P**) e a variação da superfície livre média (h_{PM}-h_{BM}), para as diferentes estações do estuário. Foram descritas por: $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq37m3/s}$=1.30x10^6*$(h_{PM}$-$h_{BM})_{Emb}$-5.24x10^5=9.55x10^5*$A_{w,Emb}$-3.19x10^5, com r_{Emb}=0.998, r^2_{Emb}=0.996, p<0.05, N_{Emb}=3; por $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq155m3/s}$=7.0x10^5*$(h_{PM}$-$h_{BM})_{Emb}$-52597, com r_{Emb}=0.987, r^2_{Emb}=0.98, N_{Emb}=3; por $\mathbf{P}_{BS}$≈$\mathbf{P}_{Gala}$=9.82x10^5*$(h_{PM}$-$h_{BM})_{Gala}$-6.62x10^5=9.31x10^5*$A_{w,Gala}$-6.67x10^5, com r_{Gala}=0.988, r^2_{Gala}=0.98, p<0.01, N_{Gala}=10; e por $\mathbf{P}_{5I,Qr\leq46m3/s}$=1.39x10^5*$(h_{PM}$-$h_{BM})_{5I}$-8.43x10^5, com r_{5I}=0.97, r^2_{5I}=0.93, p<0.05, N_{5I}=4. As regressões nos canais principais foram definidas por $\mathbf{P}_{CP,Qr\leq37m3/s}$=3.22x10^5*$(h_{PM}$-$h_{BM})_{Emb}$+1.38x10^5=2.44x10^4*$A_{w,Emb}$+3.48x10^5, $\mathbf{P}_{CP,92\leq Qr\leq155m3/s}$=-2.82x10^5*$(h_{PM}$-$h_{BM})_{Emb}$+6.09x10^5=-3.12x10^5*$A_{w,Emb}$+5.89x10^5. Os testes de Durbin-Watson atestaram a independência das variáveis. Registaram-se prismas de maré mais elevados sob marés de maior amplitude.....344

Figura 5.3.4.6. Regressões entre os prismas de maré (**P**) e a variação do o parâmetro $(U_{rms})^3$ nas diferentes estações do estuário. Foram descritas pelas seguintes equações: $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq37m3/s}$=2.55x10^7*$(U_{rms})^3_{Emb}$+201690, com r_{Emb}=0.95, r^2_{Emb}=0.91, N_{Emb}=3; $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq155m3/s}$=2.33x10^7*$(U_{rms})^3_{Emb}$+203526, com r_{Emb}=0.94, r^2_{Emb}=0.88, p<0.01, N_{Emb}=6; $\mathbf{P}_{Gala,Qr\leq46m3/s}$=2.37x10^7*$(U_{rms})^3_{Gala}$+384742, com r_{Gala}=0.77, r^2_{Gala}=0.59, p<0.05, N_{Gala}=10; $\mathbf{P}_{5I,Qr\leq142m3/s}$=2.65x10^7*$(U_{rms})^3_{Gala}$+340567, com r_{5I}=0.90, r^2_{5I}=0.81, p<0.05, N_{Emb}=6; e por $\mathbf{P}_{EE}$=2x10^7*$(U_{rms})^3_{Gala}$+236509, com N_{EE}=2. Os valores de Durbin-Watson definiram a independência destas variáveis, com $1.7\leq t_{DW}\leq2.5$. Os prismas de maré foram mais elevados sob marés de maior $(U_{rms})^3$.....349

Figura 5.3.4.7. Prismas de maré estimados para o braço sul em função da variação da superfície livre. Na legenda, "$\mathbf{P}_{,Gala}$" representam as magnitudes dos Prismas de maré determinados no âmbito deste trabalho na estação da Gala, enquanto "$\mathbf{P}_{,Duarte\ et\ al\ (2002)}$" representaram os prismas de maré numéricos determinados por Duarte *et al* (2002). As magnitudes dos prismas de maré determinados por estes dois métodos distintos foram praticamente coincidentes.....350

Figura 5.3.4.8. Diagrama de Circulação-estratificação definido para o canal principal do estuário tendo por base parâmetros hidrográficos referentes aos vários ciclos de maré medidos nas estações da Embocadura e nos Cinco Irmãos. Em ordenadas encontram-se projectadas as relações obtidas entre o prisma de maré e o volume fluvial (**P**/R) obtidas para os vários ciclos de maré, enquanto em abcissas as respectivas descargas do Mondego (Q_r), expressas em m^3/s. As escalas de ambos os eixos encontram-se em três linhas de igual altura da maré, nomeadamente para marés de baixa amplitude ($A_w \approx 0.9m$), marés médias ($A_w \approx 1.6m$) e marés de amplitude muito elevada ($A_w \approx 2.6m$). As marés vivas posicionaram-se para $A_w > 1.6m$, enquanto as mortas para $A_w < 1.6m$. Projectaram-se igualmente os caudais médios do Mondego de época estival (de $Q_r \approx 10m^3/s$), os caudais médios anuais (de $Q_r \approx 70m^3/s$) e os caudais de cheia anual (de $Q_r \approx 900m^3/s$). A estes, corresponderam respectivamente regimes bem misturados, parcialmente misturados e de cunha salina. No diagrama, os domínios de mistura e estratificação do tipo I, II, e III foram definidos respectivamente para razões de $(\mathbf{P}/R)_{Emb} < 0.25$, de $0.25 < (\mathbf{P}/R)_{Emb} < 1$, e de $(\mathbf{P}/R)_{Emb} > 1$. Na estação dos Cincos Irmãos a transição do domínio I para o II correspondeu a $(\mathbf{P}/R)_{5I} \approx 0.35$. Para marés médias de $A_{w,Emb} \approx 1.6m$, o quadro de mistura do tipo I teve lugar sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb} > 80m^3/s$, o tipo II ocorreu sob descargas compreendidas entre os $20 < Q_{r,Emb} < 80m^3/s$, e para o tipo III sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb} < 20m^3/s$. Na legenda desta figura, "Emb" representou os ciclos de maré correspondentes à estação da Embocadura, "5I" os da estação dos Cinco Irmãos e "Gala" os da estação da Gala.....352

Figura 5.3.4.9. Tendências de variação definidas apartir da confrontação dos prismas de maré determinados no estuário pelo método secção-velocidade (**P**) com os prismas geométricos obtidos apartir do levantamento batimétrico vectorizado do estuário tendo em consideração as variações longitudinais da ZM. Foram definidas as seguintes equações de regressão: $P_{g,Emb} = 4.411 * P_{Emb}$, com $r^2 = 0.94$, $r = 0.97$, $p < 0.05$, $N = 6$; $P_{g,5I} = 1.0653 * P_{5I}$, com $r^2 = 0.62$, $r = 0.79$, $N = 6$; $P_{g,Gala} = 0.9907 * P_{Gala}$, com $r^2 = 0.50$, $r = 0.70$, $p < 0.05$, $N = 10$. Na legenda Emb, 5I e Gala representaram respectivamente os prismas de maré referentes à estação da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos. 357

Figura 5.3.4.10. Diagrama de Circulação-estratificação definido para o braço sul do estuário tendo por base parâmetros hidrográficos referentes às 10 séries de dados medidas na estação da

Gala. Em ordenadas encontram-se projectadas as relações obtidas entre o prisma de maré e o volume fluvial (**P**/R) obtidas para os vários ciclos de maré, enquanto em abcissas as respectivas descargas do rio Pranto (Q_r), expressas em m^3/s. As escalas de ambos os eixos encontram-se três linhas de igual altura da maré, nomeadamente para marés de baixa amplitude ($A_w \approx 0.9m$), marés médias ($A_w \approx 1.6m$) e marés de amplitude muito elevada ($A_w \approx 2.6m$). As marés vivas posicionaram-se para $A_w > 1.6m$, enquanto as mortas para $A_w < 1.6m$. No diagrama, os domínios de mistura e estratificação do tipo II e III distribuíram-se de uma forma aleatória no diagrama. Os caudais do Pranto durante a época estival foram praticamente nulos, pelo que foram apenas projectados os caudais médios anuais ($Q_r \approx 1.5 m^3/s$) e os caudais médios de Inverno que poderão ter rondado os $Q_r \approx 14 m^3/s$. Na legenda desta figura, "Gala" representou os ciclos de maré medidos na estação da Gala, enquanto "Emb" e "5I" nas estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos.....359

Figura 5.3.4.11. Diagrama Circulação-estratificação do estuário do Mondego tendo por base o Tempo de residência (T_r) determinado para os vários ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura (Emb), Cinco Irmãos (5I) e Gala (Gala). O Tempo de residência é expresso em ciclos de maré. Em ordenadas relaciona-se o T_r com as descargas fluviais (Q_r) expressas em m^3/s, sob a forma do quociente T_r/Q_r e em abcissas as respectivas magnitudes de Q_r. Este diagrama para além de descrever Tempos de residência mais pequenos sob descargas fluviais mais elevadas, realça T_r comparativamente mais elevados nas estações dos 5I na Gala. 366

Figura 5.3.5.1. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela componente vertical $[(M_4/M_2)_h]$ dos diversos ciclos de maré aferidos nas quatro estações do estuário, com a variação dos caudais fluviais registados em cada uma delas. Na legenda, $(M_4/M_2)_{Emb}$, $(M_4/M_2)_{Gala}$, $(M_4/M_2)_{5I}$ e $(M_4/M_2)_{EE}$ representaram as distorções registadas nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. As regressões obtidas foram descritas por $(M_4/M_2)_{Emb,h,Qr\leq 155 m^3/s} = 0.0003 * Q_{r,Emb} + 0.0154$ com $r^2_{Emb,Qr} = 0.72$, $r_{Emb,Qr} = 0.85$, $p < 0.05$, $t_{D\text{-}W,Emb,Qr} = 2.1$, $N_{Emb} = 6$; $(M_4/M_2)_{5I,h,Qr\leq 142 m^3/s} = 0.0001 * Q_{r,5I} + 0.0488$ com $r^2_{5I,Qr} = 0.90$, $r_{5I,Qr} = 0.95$, $p < 0.01$, $N_{5I} = 6$; $(M_4/M_2)_{EE,h,Qr\leq 160 m^3/s} = 0.0014 * Q_{r,EE} + 0.0491$ com $r^2_{EE,Qr} = 0.999$, $r_{EE,Qr} = 0.999$, $p < 0.05$, $N_{EE} = 3$. Os valores de $1.7 \leq t_{DW} \leq 2.4$ atestam a independência destas variáveis.....369

Figura 5.3.5.2. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela componente vertical da maré $[(M_4/M_2)_h]$ e a variação da altura da maré, para as diferentes estações do estuário. Na legenda, $(M_4/M_2)_{Emb}$, $(M_4/M_2)_{Gala}$, $(M_4/M_2)_{5I}$ e $(M_4/M_2)_{EE}$ representaram as distorções registadas nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. As regressões obtidas foram descritas por: $(M_4/M_2)_{Emb,h,Qr\leq 155 m^3/s} = 0.0272 * A_{w,Emb} + 0.0031$ com $r^2_{Emb,Aw} = 0.64$, $r_{Emb,Aw} = 0.81$, $p < 0.05$, $t_{D\text{-}W,Emb,Aw} = 2.1$, $N_{Emb} = 6$; $(M_4/M_2)_{Gala,h,Qr\leq 46 m^3/s} = 0.0226 * A_{w,Gala} - 0.0051$ com $r^2_{Gala,Aw} = 0.39$, $r_{Gala,Aw} = 0.63$,

p<0.05, N_{Gala}=10; $(M_4/M_2)_{5I,h,Qr\leq142m^3/s}$=0.1005*$A_{w,5I}$-0.047 com $r^2_{5I,Aw}$=0.59, $r_{5I,Aw}$=0.77, N_{5I}=6. Estas variáveis foram consideradas independentes, uma vez que 1.6≤$t_{D\text{-}W}$≤2.2.....370

Figura 5.3.5.3. Regressões definidas entre a componente horizontal da maré [$(M_4/M_2)_u$] e as descargas fluviais (Q_r) registadas nas diferentes estações do estuário. Na legenda $(M_4/M_2)_{Emb}$, $(M_4/M_2)_{Gala}$, $(M_4/M_2)_{5I}$ e $(M_4/M_2)_{EE}$ representaram as distorções registadas nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. As regressões obtidas foram descritas na Embocadura por $(M_4/M_2)_{Emb,u,Qr\leq155m^3/s}$=0.0006*$Q_{r,Emb}$+0.1094 com $r_{Emb,Qr}$=0.88, p<0.05, N_{Emb}=6; nos Cinco Irmãos por $(M_4/M_2)_{5I,u,Qr\leq142m^3/s}$=0.0016*$Q_{r,5I}$+0.1153 com $r_{5I,Qr}$=0.88, p<0.05, N_{5I}=6 e por $(M_4/M_2)_{EE,u,Qr\leq160m^3/s}$=0.0016*$Q_{r,EE}$+0.2113 com $r_{EE,Qr}$=0.91, N_{EE}=3. Os valores de 1.7≤t_{DW}≤2.7 apontaram para a independência das variáveis.....374

Figura 5.3.5.4. Variações da distorção sofrida pela componente horizontal [$(M_4/M_2)_u$] dos ciclos de maré aferidos nas quatro estações do estuário, com a variação da altura da maré. As regressões obtidas foram caracterizadas para a Embocadura por $(M_4/M_2)_{Emb,u,Qr\leq155m^3/s}$=0.0578*$A_{w,Emb}$+0.0614 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.88, $r_{Emb,Aw}$=0.94, p<0.05, N_{Emb}=6; para a Gala por $(M_4/M_2)_{Gala,u,Qr\leq46m^3/s}$=0.108*$A_{w,Gala}$-0.0009 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.69, $r_{Gala,Aw}$=0.83, p<0.01, N_{Gala}=10; para os Cinco Irmãos por $(M_4/M_2)_{5I,u,Qr\leq142m^3/s}$=0.161*$A_{w,5I}$-0.0387 com $r^2_{5I,Aw}$≈0.51, $r_{5I,Aw}$=0.72, N_{5I}=6; e para a Estação Elevatória por $(M_4/M_2)_{EE,u,Qr\leq160m^3/s}$=0.246*$A_{w,EE}$-0.0269 com $r^2_{EE,Aw}$=0.37, $r_{EE,Aw}$=0.61, N=3. Os resultados de 1.6≤t_{DW}≤2.7 atestam a independência destas variáveis.....375

Figura 5.3.5.5. Regressões obtidas entre a distorção média sofrida pelos escoamentos na preia-mar ($Ø_{PM,m}$) e a variação da altura da maré (A_w), nas diferentes estações do estuário. A distorção $Ø_{PM,m}$, foi descrita pelo atraso expresso em graus que a estofa da preia-mar apresentou relativamente à PM. As regressões obtidas foram definidas por: $Ø_{PM,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-4.1148*$A_{w,Emb}$+12.283 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.66, $r_{Emb,Aw}$=-0.81, p<0.05, N_{Emb}=6; por $Ø_{PM,m,Gala,Qr\leq46m^3/s}$=3.7455*$A_{w,Gala}$-1.5737 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.85, $r_{Gala,Aw}$=0.92, p<0.01, N_{Gala}=10. Nos Cinco Irmãos obteve-se $Ø_{PM,5I,Qr\leq142m^3/s}$=-2.2433*$A_{w,5I}$+11.638 com $r^2_{5I,Aw}$=0.39, $r_{5I,Aw}$=-0.62, N_{5I}=6, enquanto na Est. Elevatória $r^2_{EE,Aw}$=0.76, $r_{EE,Aw}$=0.87, N_{EE}=3. Na legenda, $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m3/s}$ representou as distorções registadas na Embocadura para os ciclos de maré regidos por caudais do Mondego inferiores a Q_r≤37m^3/s. Considerando-se apenas estes baixos regimes, obteve-se na Embocadura uma regressão definida por: $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m^3/s}$≈2.7762*$A_{w,Emb}$+4.5939 com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}$=0.85, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}$=0.92, N_{Emb}=3. Os de 1.8≤t_{DW}≤2.8 validaram a independência destas variáveis.....377

Figura 5.3.5.6. Tendências de variação ocorridas entre a distorção sofrida pelos escoamentos na preia-mar ($Ø_{PM,m}$) e as magnitudes das descargas fluviais (Q_r), nas diferentes estações do estuário. As regressões obtidas foram representadas na Embocadura por $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.0579*$Q_{r,Emb}$+9.9022 com $r^2_{Emb,Qr}$=0.92, $r_{Emb,Qr}$=-0.96, p<0.01, N_{Emb}=6 e nos Cinco Irmãos por $Ø_{PM,m,5I,Qr\leq142m3/s}$=-0.025*$Q_{r,5I}$+9.6627 com $r^2_{5I,Qr}$=0.74, $r_{5I,Qr}$=-0.86, p<0.05, N_{5I}=6.....378

Figura 5.3.5.7. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela maré na fase de menor altura da coluna de água ($Ø_{BM,m}$) e a variação da altura da maré, nas diferentes estações do estuário. A distorção $Ø_{BM,m}$ correspondeu ao atraso temporal ocorrido entre a estofa da baixa-mar e a BM, convertido em graus de acordo Dyer (1997). As regressões foram definidas, na Embocadura por $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=26.589*$A_{w,Emb}$-13.089 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.87, $r_{Emb,Aw}$=0.93, p<0.01, N_{Emb}=6 e nos Cinco Irmãos por $Ø_{BM,m,5I,Qr\leq142m^3/s}$=26.773*$A_{w,5I}$-16.239 com $r^2_{5I,Aw}$=0.75, $r_{5I,Aw}$=0.84, p<0.01, N_{5I}=6. Os valores de 1.8≤t_{DW}≤2.4 atestaram a independência destas variáveis.....384

Figura 5.3.5.8. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela maré na fase de menor altura da coluna de água ($Ø_{BM,m}$) e a variação dos caudais fluviais (Q_r), nas diferentes estações do estuário. A distorção $Ø_{BM,m}$ correspondeu ao atraso temporal ocorrido entre a estofa da baixa-mar dos escoamentos médios e a BM, tendo sido expresso em graus de acordo com Dyer (1997). As regressões foram descritas na Embocadura por $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=0.2629*$Q_{r,Emb}$-10.849 com $r^2_{Emb,Qr}$=0.64, $r_{Emb,Qr}$=0.81, p<0.05, N_{Emb}=6; na Gala por $Ø_{BM,m,Gala,Qr\leq46m^3/s}$=0.2323*$Q_{r,Gala}$-8.3109 com $r^2_{Gala,Qr}$=0.71, $r_{Gala,Qr}$=0.84, p<0.05, N_{Gala}=10; nos Cinco Irmãos por $Ø_{BM,m,5I,Qr\leq142m^3/s}$=0.2192*$Q_{r,5I}$-12.266 com $r^2_{5I,Qr}$=0.76, $r_{5I,Qr}$=0.87, p<0.05, N_{5I}=6 e na Est. Elevatória por $Ø_{BM,m,EE,Qr\leq160m^3/s}$≈0.1473*$Q_{r,EE}$-11.174 com $r^2_{EE,Qr}$=0.99, $r_{EE,Qr}$=0.997, p<0.05, N_{EE}= 3. Os resultados de 1.8≤t_{DW}≤2.2 atestaram a independência desta variáveis.....385

Figura 5.3.5.9. Regressões obtidas entre a distorção dos escoamentos na coluna de água ($Ø_{PM,z,Emb}$) e a variação da magnitude das descargas fluviais (Q_r). Na legenda, $Ø_{PM,b,Emb}$, $Ø_{PM,m,Emb}$ e $Ø_{PM,s,Emb}$ representaram respectivamente as distorções expressas em graus sofridas pelos escoamentos junto ao fundo, pelos escoamentos médios e pelos escoamentos de superfície, na estação da Embocadura. As relações auferidas foram: $Ø_{PM,b,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.0836*$Q_{r,Emb}$+14.48 com $r^2_{b,Qr}$=0.79, $r_{b,Qr}$=-0.89, p<0.05, $N_{b,Emb}$=6 para os escoamentos de fundo; de $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.0579*$Q_{r,Emb}$+9.9022 com $r^2_{m,Qr}$=0.92, $r_{m,Qr}$=-0.96, p<0.05, $N_{m,Emb}$=6 para os escoamentos médios, e de $Ø_{PM,s,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.2428*$Q_{r,Emb}$+10.231 com $r^2_{s,Qr}$=0.79, $r_{s,Qr}$=-0.89, p<0.05, $N_{s,Emb}$=6 para os escoamentos de superfície.....389

Figura 5.3.5.10. Regressões obtidas entre a distorção dos escoamentos na coluna de água ($Ø_{PM,z,Emb}$) com a variação da altura da maré. Na legenda, $Ø_{PM,b,Emb}$, $Ø_{PM,m,Emb}$ e $Ø_{PM,s,Emb}$

representaram respectivamente as distorções sofridas pelos escoamentos junto ao fundo, pelos escoamentos médios e pelos escoamentos de superfície, na estação da Embocadura. $Ø_{PM,z,Qr\leq37m3/s}$ representou a distorção sofrida pelos escoamentos na PM considerando apenas os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais $Q_r \leq 37 m^3/s$. As relações auferidas foram descritas para os escoamentos de fundo por $Ø_{PM,b,Emb,Qr\leq37m^3/s}=3.4609*A_{w,Emb}+7.0801$ com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.54$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.73$, $N_{Emb}=3$; para os escoamentos médios por $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m^3/s}\approx2.7762*A_{w,Emb}+4.5939$ com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.85$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.92$, $N_{Emb}=3$, e para os escoamentos de superfície por $Ø_{PM,s,Emb,Qr\leq155m^3/s}\approx-12.924*A_{w,Emb}+13.029$ com $r_{s,Aw}=-0.55$, $N_{s,Emb}=6$. Sob maiores descargas fluviais, definiu-se $Ø_{PM,b,Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}\approx-7.5*A_{w,Emb}+20.3$ com $r^2_{Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}=0.66$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.81$, $N_{Emb}=3$ e $Ø_{PM,m,Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}\approx-2.9*A_{w,Emb}+9.1$ com $r^2_{Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}=0.58$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.77$, $N_{Emb}=3$. A segunda ordenada deste gráfico (Y_2) representou a percentagem que o atrito de fundo interveio na distorção dos escoamentos médios ($\%_{atrito,ØPM,m}$) e nos escoamentos de fundo ($\%_{atrito,ØPM,b}$), determinadas com recurso à expressão 5.3.4. 390

Figura 5.3.5.11. Regressões obtidas entre a distorção dos escoamentos na coluna de água ($Ø_{BM,z,Emb}$) com a variação da altura da maré, na estação da Embocadura, durante a fase da baixa-mar. Na legenda, $Ø_{BM,b,Emb}$, $Ø_{BM,m,Emb}$ e $Ø_{BM,s,Emb}$ representaram respectivamente as distorções sofridas pelos escoamentos na BM junto ao fundo, nos escoamentos médios e à superfície. As regressões obtidas foram descritas por $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.1547*Q_{r,Emb}+9.2438$ com $r^2_{b,Qr}=0.66$, $r_{b,Qr}=0.81$, $p<0.05$, $N_{b,Emb}=6$; $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq155m3/s}=-0.2629*Q_{r,Emb}+10.849$ com $r^2_{m,Qr}=0.64$, $r_{m,Qr}=0.81$, $p<0.05$, $N_{m,Emb}=6$; $Ø_{BM,s,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.4441*Q_{r,Emb}+31.722$ com $r^2_{s,Qr}=0.74$, $r_{s,Qr}=0.86$, $p<0.05$, $N_{s,Emb}=6$.....393

Figura 5.3.5.12. Distorção sofrida pelos escoamentos em diferentes níveis da coluna de água ($Ø_{BM,z,Emb}$) e suas relações com a variação da altura da maré ($A_{w,Emb}$), na baixa-mar e na estação da Embocadura. A segunda ordenada do gráfico (Y_2) ilustra as percentagens relativas estimadas para a componente do atrito de fundo na distorção dos escoamentos, junto ao fundo ($\%_{atrito,ØPM,b}$) e nos escoamentos médios ($\%_{atrito,ØPM,m}$), calculadas de acordo com a expressão 5.3.5.. Na legenda, $Ø_{b,Qr\leq37m3/s}$ representou as distorções sofridas pelos escoamentos de fundo considerando apenas os ciclos de maré regidos por caudais fluviais inferiores a $Q_r \leq 37 m^3/s$. As regressões obtidas foram descritas por $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq155m3/s}=16.008*A_{w,Emb}-5.4426$ com $r^2_{b,Aw}=0.94$, $r_{b,Aw}=0.97$, $p<0.05$, $N_{b,Emb,Qr\leq155m3/s}=6$; $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq37m3/s}=17.787*A_{w,Emb}-7.3762$ com $r^2_{b,Aw}=0.63$, $N_{b,Emb,Qr\leq37m3/s}=3$; $Ø_{BM,b,Emb,92\leq Qr\leq155m3/s}\approx16.4*A_{w,Emb}-6.7$ com $r^2_{b,Aw}=0.999$, $N_{b,Emb}=3$; $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq155m3/s}=26.589*A_{w,Emb}-13.089$ com $r^2_{m,Aw}=0.87$, $r_{m,Aw}=0.93$, $p<0.05$, $N_{m,Emb}=6$; $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq37m3/s}=14.164*A_{w,Emb}+25.814$

com $r^2_{m,Aw}$=0.29, $r_{m,Aw}$=0.54, $N_{m,Emb}$=3; $Ø_{BM,s,Emb,Qr\leq155m3/s}$=38.258*$A_{w,Emb}$+2.3378 com $r^2_{s,Aw}$=0.73, $r_{s,Aw}$=0.85, p<0.05, $N_{s,Emb}$=6.....394

Figura 5.3.5.13. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação da Embocadura.....396

Figura 5.3.5.14. Tendências de variação definidas entre as distorções registadas nos três níveis batimétricos em análise ($Ø_{PM,z,Gala}$) e a variação da altura da maré ($A_{w,Gala}$), na PM, na estação da Gala. Na legenda, $Ø_{PM,b,Gala}$, $Ø_{PM,m,Gala}$ e $Ø_{PM,s,Gala}$ representaram as distorções sofridas pelos escoamentos junto ao fundo, nos médios e à superfície, respectivamente. As regressões obtidas foram expressas em graus e descritas por $Ø_{PM,b,Gala}$=3.4815*$A_{w,Gala}$+1.6092 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.56, $r_{b,Aw}$=0.75, p<0.05, $N_{b,Gala}$=10 para os escoamentos de fundo; por $Ø_{PM,m,Gala}$=3.7455*$A_{w,Gala}$-1.5737 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.84, $r_{m,Aw}$=0.92, p<0.01, $N_{m,Gala}$=10 para os escoamentos médios e por $Ø_{PM,s,Gala}$ =3.0405*$A_{w,Gala}$+2.3089 com $r^2_{Gala,Aw}$=0.47, $r_{s,Aw}$=0.68, p<0.05, $N_{s,Gala}$=10 para os escoamentos de superfície.....400

Figura 5.3.5.15. Distorções sofridas pelos escoamentos nos vários níveis da coluna de água, na baixa-mar ($Ø_{BM,z,Gala}$), na estação da Gala. Tendências de variação de $Ø_{BM,z,Gala}$ com $Q_{r,Gala}$. Na legenda $Ø_{BM,b,Gala}$, $Ø_{BM,m,Gala}$ e $Ø_{BM,s,Gala}$ representaram as distorções sofridas pelos escoamentos de fundo, médios e de superfície, expressas em graus. As regressões obtidas foram descritas nos escoamentos de fundo por $Ø_{BM,b,Gala}$=0.1328*$Q_{r,Gala}$+8.1961 com $r^2_{s,Qr}$=0.40, $r_{b,Qr}$=0.63, p<0.05, $N_{b,Gala}$=10, nos escoamentos médios por $Ø_{BM,m,Gala}$=0.2323*$Q_{r,Gala}$-8.3109 com $r^2_{s,Qr}$=0.71, r_m=0.84, p<0.05, $N_{m,Qr}$=10, enquanto nos escoamentos de superfície por $Ø_{BM,s,Gala}$=0.2985*$Q_{r,Gala}$+9.802 com $r^2_{s,Qr}$=0.62, $r_{s,Qr}$=0.78, p<0.05, $N_{s,Gala}$=10.....402

Figura 5.3.5.16. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação da Gala.....404

Figura 5.3.5.17. Relações obtidas entre as distorções registadas nos diferentes níveis batimétricos ($Ø_{PM,z,5I}$) e a variação da altura da maré, para a fase da PM na estação dos Cinco Irmãos. Para os escoamentos de fundo obtiveram-se distorções expressas em graus por intermédio de $Ø_{PM,b,5I,Qr\leq142m^3/s}$=4.1408*$A_{w,5I}$+10.21 com $r^2_{5I,Aw}$=0.38, $r_{b,Aw}$=0.62, $N_{b,5I}$=6. Para os escoamentos médios obtiveram-se $Ø_{PM,m,5I,Qr\leq142m^3/s}$=-2.2433*$A_{w,5I}$+11.638 com $r^2_{5I,Aw}$=0.39, $r_{5I,Aw}$=-0.62, N_{5I}=6 e $Ø_{PM,b,5I,Qr\leq43m^3/s}$=9.1174*$A_{w,5I}$+2.7042 com $r^2_{5I,Aw}$=0.85, $r_{b,Aw}$=0.92, $N_{b,5I}$=3. Para os escoamentos de superfície obteve-se $Ø_{PM,s,5I,Qr\leq142m^3/s}$=-9.5345*$A_{w,5I}$+7.9163 com $r^2_{5I,Aw}$=0.33, $r_{s,Aw}$=-0.57, $N_{s,5I}$=6.....406

Figura 5.3.5.18. Regressões obtidas entre as distorções registadas nos diferentes níveis batimétricos ($Ø_{BM,z,5I}$) e a variação das descargas do Mondego, para a fase da BM na estação dos

Cinco Irmãos. Para os escoamentos de fundo obteve-se $Ø_{BM,b,5I,Qr\leq142m^3/s}=0.1952*Q_{r,5I}+8.2103$ com $r^2_{5I,Qr}=0.73$, $r_{b,Qr}=0.85$, $p<0.05$, $N_{b,5I}=6$, para os médios $Ø_{BM,m,5I,Qr\leq142m^3/s}=0.2192*Q_{r,5I}+12.266$ com $r^2_{5I,Qr}=0.76$, $r_{5I,Qr}=0.87$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$ e para os escoamentos de superfície $Ø_{BM,s,5I,Qr\leq142m^3/s}=0.2567*Q_{r,5I}+15.645$ com $r^2_{5I,Qr}=0.67$, $r_{s,Qr}=0.82$, $p<0.05$, $N_s=6$.....409

Figura 5.3.5.19. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação dos Cinco Irmãos.....410

Figura 5.3.5.20. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação Elevatória.....412

Figura 5.4.1. Curvas de distribuição granulométrica de sedimentos de fundo amostrados nos dois braços do estuário 417

Figura 5.4. 2. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré). Nos gráficos a) e b) relacionam-se os caudais sólidos e a velocidade de fundo, respectivamente nos ciclos de maré E100893 e no E111193. Na legenda da figura, q_{sb} representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal, linearmente interpolado, $q_{sb,N}$ o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem E(N), o $q_{sb,M}$ o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem E(M), e $q_{sb,S}$ o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem E(S). Por fim, $q_{sb,Res}$ representou o caudal sólido de fundo residual 419

Figura 5.4.3. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré). Nos gráficos a) e b) relacionam-se os caudais sólidos e a velocidade de fundo, respectivamente nos ciclos de maré 5I140392 e no 5I511293. Na legenda da figura, q_{sb} representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal, linearmente interpolado, $q_{sb,N}$ o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem 5I(N), o $q_{sb,M}$ o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem 5I(M), e $q_{sb,S}$ o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem 5I(S). Por fim, $q_{sb,Res}$ representou o caudal sólido de fundo residual 420

Figura 4.5.4. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré) medidos na estação Elevatória, no ciclo de maré EE151193. Na legenda da figura, q_{sb} representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal, linearmente interpolado, $q_{sb,N}$ o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem EE(N), o $q_{sb,M}$ o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem EE(M), e $q_{sb,S}$ o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem EE(S). Por fim, $q_{sb,Res}$ representou o caudal sólido de fundo residual 421

Figura 4.5.5. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré). Nesta figura, (q_{sb}) representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal linearmente interpolado, ($q_{sb,N}$) o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem G(N), ($q_{sb,M}$) o

caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem G(M), ($q_{sb,S}$) o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem G(S), e por fim, ($q_{sb,Res}$) representou o caudal sólido de fundo residual. No gráfico a) relacionaram-se os caudais sólidos (q_{sb}) com a velocidade de fundo no ciclo de maré G60293. O volume de sedimento que entrou durante a enchente foi superior ao que saiu durante a vazante, em aproximadamente 0.5m^3/ciclo maré 422

Figura 5.4.6. Diagrama conceptual de circulação e do transporte sedimentar para o canal principal do estuário do Mondego. Na legenda Emb, 5I, EE e Gala, representam os resultados obtidos referentes aos ciclos de maré determinados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos, Elevatória, e Gala. $TS_{enchente}$ e $TS_{vazante}$ representam os vectores da resultante do transporte sedimentar de fundo que se fez respectivamente para enchente e para vazante. Na figura, o comprimento dos vectores do $TS_{enchente}$ e do $TS_{vazante}$ reflectiram a multiplicação de factor de correcção pelo q_{sb}, de forma a serem bem observáveis no diagrama 427

Figura 5.4.7. Diagrama conceptual de circulação e do transporte sedimentar para o braço sul do estuário do Mondego. Na legenda Emb, 5I, EE e Gala, representam os resultados obtidos referentes aos ciclos de maré determinados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos, Elevatória, e Gala. $TS_{enchente}$ e $TS_{vazante}$ representam os vectores da resultante do transporte sedimentar de fundo que se fez respectivamente para enchente e para vazante. Na figura, o comprimento dos vectores do $TS_{enchente}$ e do $TS_{vazante}$ reflectiram a multiplicação de factor de correcção pelo q_{sb}, de forma a serem bem observáveis no diagrama 428

Índice de Quadros

Capítulo 2

Quadro 2.1. Síntese das características morfológicos, batimétricas e estruturais mais relevantes usadas na definição dos diferentes sectores do estuário do Mondego 15

Quadro 2. 2. Características fisiográficas dos sectores do estuário sujeitos às obras de regularização do troço terminal do Leito Regularizado do Baixo Mondego, compreendido entre os Cinco Irmãos e o Porto da Figueira da Foz. 21

Capítulo 3

Quadro 3. 1. Amplitudes e fases das constituintes harmónicas M_2, S_2, K_1, O_1 e M_4, obtidas por Baptista (1990) e em Baptista *et al* (1995). 67

Quadro 3. 2. Amplitudes e fases das constituintes harmónicas M_2, S_2, K_1 e O_1, gentilmente fornecidas pelo Instituto Hidrográfico, obtidas do marégrafo localizado no Cais de serviços (Lat.40°08'.8N; Long.8°51'.3W).....68

Capítulo 4

Quadro 4. 1. Quadro ilustrativo das campanhas e das séries de dados colhidas nas várias estações do estuário. Estas abrangeram vários quadros de altura da maré (A_w) e descargas fluviais (Q_r) e condições meteorológicas.....79

Quadro 4.2. Perfis longitudinais realizados no canal principal (CP) e ao longo do braço sul (BS), sob várias alturas da maré (A_w) e descargas fluviais (Q_r). As campanhas de campo decorreram em períodos de manutenção da draga.....81

Quadro 4. 3. Tipos de mistura e de estratificação considerados para o estuário do Mondego. Adaptado e modificado de Unesco (1992). 99

Quadro 4. 4. Elementos e parâmetros da maré determinados pelas expressões definidas em van Rijn (1994), que entra em consideração com as amplitudes das constituintes M_2, S_2, K_1 e O_1. Nas formulas, $h_o \approx +2$mZH e representou o nível médio da variação da superfície livre. 108

Capítulo 5

Quadro 5.1.1. Níveis críticos da maré calculados para as diferentes estações do estuário do Mondego. Na primeira linha, Dist simbolizou a distância longitudinal em km que as estações apresentaram relativamente à foz do Mondego. Os restantes parâmetros representam as diferentes níveis ou alturas da maré expressos em mZH ou em metros, tendo correspondido PMMMV à preia-mar média das marés vivas, BMMMV à baixa-mar média das marés vivas, AMMV à altura média das marés vivas, PMMMM à preia-mar média das marés mortas, BMMMM à baixa-mar média das marés mortas, AMMM à altura média das marés mortas, PMMax à preia-mar máxima,

BMMin à baixa-mar mínima, AMax à altura máxima da maré, AMM à altura média da maré, PMM à preia-mar média anual, BMM à baixa-mar média anual, DMM à diferença máxima diária da maré, PF ao parâmetro de forma da maré e Mbn, Mbs e ME aos valores médios dos diferentes parâmetros respectivamente para o braço norte (considerando as estações 1, 2, 3 e 4), o braço sul (ponderando as estações 4 e 5) e para todo o estuário (avaliando as estações 1, 2, 3, 4 e 5).....121

Quadro 5.1.2. Elementos de maré considerados para as variação da superfície livre tabeladas pelo Instituto Hidrográfico, determinados apartir das constituintes harmónicas apresentadas no quadro 3.2.....127

Quadro 5.1.3. Ambientes adoptados para o estuário do Mondego função dos patamares médios da variação da superfície livre e sua breve descrição.....128

Quadro 5.2.1. Importâncias relativas das áreas e dos volumes ocupados pelos diferentes ambientes definidos pela variação da superfície, nos diferentes sectores fisiográficos do estuário do Mondego, antes dos trabalhos de regularização do braço norte. A sombreado realçam-se os tipos de ambientes que dominam os diferentes sectores fisiográficos.....135

Quadro 5.2.2. Importâncias relativas das áreas e dos volumes ocupados pelos diferentes ambientes relacionados com a variação da superfície, nos diferentes sectores fisiográficos do estuário do Mondego, durante os trabalhos de regularização do braço norte. Estes resultados referem-se ao levantamento batimétrico de 1995 realizado pela Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos. A sombreado realçam-se os tipos de ambientes que dominam os vários sectores fisiográficos. O símbolo (*) representou os troços de canal que sofreram trabalhos de dragagem, precedentes ao novo traçado regularizado.....138

Quadro 5.2.3. Características morfológicas, batimétricas e estruturais similares apresentadas pelos diferentes sectores do estuário, antes das obras de regularização do braço norte. Definição das importâncias relativas dos diferentes ambientes em estudo em cada sector fisiográfico. A profundidade média e a largura dos canais foram determinados para o nível médio das águas do mar, para +2mZH. A análise espacial e volumétrica percentual determinada para os diferentes ambientes referiu-se a cada sector fisiográfico em análise.....151

Quadro 5.2.4. Características morfológicas, batimétricas e estruturais apresentadas pelos diferentes sectores do estuário, durante as obras de regularização do braço norte. Definição das importâncias relativas dos diferentes ambientes em estudo em cada sector fisiográfico. A profundidade média e a largura dos canais foram determinados para o nível médio das águas do mar, para +2mZH. ASP representou os ambientes submareais permanentes, AI, os ambientes intermareais, AIF os ambientes intermareais mais frequentes, AIEF os ambientes esporadicamente

expostos ao ar pela maré e AS os ambientes apenas inundados aquando de níveis de cheia ou sob temporais.....154

Quadro 5.2.5. Larguras e profundidades médias dos diferentes sectores fisiográficos do estuário, determinadas para as baixa-mares médias anuais (BMM), para o nível médio da variação da maré (NMM) e para as preia-mares médias (PMM), antes e durante os trabalhos de regularização do braço norte.....166

Quadro 5.3.1.1. Posições relativas do domínio marinho no estuário aquando da preia-mar ($R_{ZC,PM}$) e aquando da baixa-mar ($R_{ZCB,M}$), bem como da zona de mistura ($R_{ZM,PM}$ e $R_{ZM,BM}$) determinadas para os diferentes ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos e nos perfis longitudinais (PL) efectuados ao longo do canal principal (CP) e do braço sul (BS). Apresentam-se também as distâncias médias longitudinais percorridas pelo domínio marinho (L_{ZC}) e pela zona de mistura (L_{ZM}). Exibem-se igualmente as correspondentes alturas da maré (A_w) e as descargas fluviais (Q_r) determinadas nas várias estações do estuário e as respectivas alturas da maré estimadas pelo Instituto Hidrográfico ($A_{w,IH}$) e descargas do Mondego aferidas no Açude de Ponte em Coimbra ($Q_{r,APC}$). As siglas n_s, $R_{i,}$ e R_{iE} representam os parâmetros de estratificação, de Richardson e de Richardson estuarino. Apresentam-se igualmente, o prisma de maré (P) medido nas diferentes estações do estuário e o prisma de maré geométrico (P_g) determinado apartir dos levantamentos cartográficos vectorizados do estuário.....232

Quadro 5.3.1.2. Ordens de grandeza das componentes barotrópica e baroclínica da componente longitudinal da força de gradiente de pressão por unidade de massa determinado para o canal principal do estuário do Mondego. Estas foram expressas em N/m^2 e tiveram por base uma maré média de AMM≈1.6m, sob descargas $Q_{r,Emb}$≈26m^3/s, um comprimento longitudinal da zona de mistura de $R_{ZM,PM,CP}$ ≈13.1km e uma profundidade média deste canal de h_{CP}≈2.7m, determinados com base na análise das séries de dados maregráficos de E080392 e de 5I70372 aquando da campanha de campo de 5-80392.....265

Quadro 5.3.2.1. Coeficientes de atrito determinados para as quatro estações do estuário.....302

Quadro 5.3.4.1. Prismas de maré médios aferidos nas estações da Embocadura ($\overline{P}_{Emb}$) e da Gala ($\overline{P}_{Gala}$) sob diferentes regimes fluviais do Mondego. Percentagens dos volumes de **P** registados na Embocadura que se propagaram pelo canal principal do estuário ($\%\,\overline{P}_{CP}$) e pelo braço sul ($\%\,\overline{P}_{BS}$).....347

Quadro 5.3.4.2. Quadro com as magnitudes das alturas da maré (Aw), com as descargas fluviais (Qr), com os prismas de maré (P), com os volumes fluviais (R), as amplitudes da velocidade da

constituinte M2 (UM2), as velocidades médias das fases das enchentes (Ue) e vazantes (Uv)), os factores de fluxo retorno (b) e com os Tempos de residência de terminados para as estações da Embocadura (Emb), Gala (G) e Cinco Irmãos (5I).....365

Quadro 5.4.1. Taxas de transporte sedimentar de fundo determinadas para cada ciclo de maré, nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Elevatória. As siglas A_w e Q_r representam a altura da maré e a magnitude dos caudais fluviais, enquanto as $U_{f,v}$, $U_{f,e}$, P/R definiram as velocidades de fundo médias da fase da vazante e da enchente, e o inverso da Razão de fluxo, de cada ciclo de maré. As siglas $q_{sb/m,v}$; $q_{sb/m,e}$ representaram as taxas médias do transporte sedimentar de fundo na fase da vazante e na enchente, por metro linear. As siglas $q_{sb,v}$; $q_{sb,e}$ e q_{sb}, definiram as taxas de transporte sedimentar médias expressas em volume, para as fases da vazante e da enchente, e o respectivo transporte residual para cada ciclo de maré 423

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Teórico do Trabalho

Os estuários são sistemas costeiros muito complexos, que servem de interface entre os ambientes marinho e continental. Apresentam uma grande variedade de formas e são por regra constituídos por intrincados sistemas de canais. São definidos pela mistura de massas de águas marinha e fluvial, bem como, servem de armadilha ao trânsito sedimentar quer em deriva longilitoral, quer transportados pelos rios (Friedman & Sanders, 1978). Os processos físicos que intervêm na hidrodinâmica e no transporte sedimentar apresentam um desempenho muito complexo e de difícil justificação (Officer, 1983 *in* Miranda *et al*, 2002), estando fundamentalmente controlados pela competição ocorrida entre a agitação marinha, as correntes de maré e as descargas fluviais, e sua interacção para com a fisiografia, podendo também ser condicionados pelo vento (Allen, 1997). Os estuários não estratificados, dominados pelo atrito de fundo correspondem a sistemas de baixa batimetria, com pequenas a moderadas áreas intermareais, que apresentam uma tendência em gerar enchentes mais curtas e velocidades de enchente mais fortes. Esta tendência é responsável por o balanço do transporte sedimentar se faça para montante, incrementando o assoreamento no sector distal do estuário e consequente redução da sua profundidade, definindo assim uma tendência evolutiva de domínio da enchente. Os estuários dominados por extensos ambientes intermareais e áreas de sapal apresentam uma grande capacidade em reter água e por conferir maiores atrasos nas preia-mares e consequentemente em gerar vazantes mais curtas e enchentes mais longas. Geralmente estes sistemas são caracterizados por velocidades de corrente de enchente inferiores às de vazante, em que a resultante do transporte sedimentar se faz em direcção à foz, tendendo a erodir os canais do estuário, aumentando a sua profundidade (Speer *et al*, 1991; Friedrichs *et al,* 1990). A acção dos caudais fluviais poderá distorcer um quadro de domínio da enchente, favorecendo os escoamentos de vazante (Tonda,

1999). Esta distorção sofrida pelos escoamentos pode ser quantificada e definida pela relação de amplitudes e das fases das constituintes M_4 e M_2, no caso de a constituinte astronómica ser a dominante (Aubrey & Speer, 1985; Speer & Aubrey, 1985; Hill, 1994).

O estuário do rio Mondego constitui um sistema natural de interface entre os ambientes marinho e fluvial, e funciona como um ambiente receptor de sedimentos. Apresenta uma dinâmica muito complexa, caracterizada por fortes e efémeras variações espacio-temporais entre massas de água com propriedades físicas, químicas e sedimentares distintas (Reis & Duarte, 1990). É definido por um complicado sistema hidráulico de canais que englobam múltiplos ambientes dinâmicos e sedimentares (Baptista *et al*, 1995). As suas reduzidas dimensões e a multiplicidade e complexidade dos fenómenos naturais ali intervenientes, torna este sistema costeiro muito difícil de estudar, mas também realça a sua vulnerabilidade. Em resposta à crescente importância comercial e ao desenvolvimento geográfico, social e económico de toda a Zona Centro do país, o estuário tem vindo a sofrer nas últimas décadas uma série de obras portuárias, de protecção costeira e de regularização (Lencastre, 1980; Ministério do Plano e da Administração do Território, 1986; Direcção-Geral dos Recursos Naturais, 1988). As modificações fisiográficas induzidas por tais obras têm provocado no estuário desequilíbrios hidrodinâmicos e sedimentares, alterando os padrões de circulação e mistura das massas de água, e fomentando o assoreamento do mesmo, produzindo alterações muitas das vezes com impactes negativos, irreversíveis (Duarte & Reis, 1992; Dinis, 1994). As actividades industrial e agrícola e os esgotos urbanos, lançam quantidades enormes de substâncias que degradam a qualidade da água, promovem a diminuição da biodiversidade que caracteriza estes sistemas costeiros, mas também poluem o estuário a médio e longo prazo, ao serem em parte retidas nos sedimentos do fundo (Forstner & Muller, 1975; Forstner *et al*, 1982; Burton, 1982; Caetano, 1989; Guerreiro (1984);

Andreae, 1982; Day *et al*, 1989; Barros, 1991; Marques *et al*, 1992; Caçador, *et al,* 1993; Duarte *et al,* 2002).

1.2. Interesse do Tema e Contribuição para o Conhecimento

A hidrodinâmica e o transporte sedimentar em sistemas estuarinos, constituem áreas do conhecimento de difícil estudo, dada a multiplicidade e complexidade dos fenómenos intervenientes (Officer, 1983 *in* Miranda *et al* (2002). O estuário do Mondego não é excepção, verificando-se actualmente um défice naquelas áreas do conhecimento. Com este trabalho, pretendeu-se para além de melhorar o conhecimento e a compreensão deste sistema costeiro, ambicionou-se dar respostas ou contributos válidos a vários problemas relacionados com a distribuição e dispersão de poluentes urbanos, industriais e agrícolas no estuário, tendo por base a informação local. A determinação de tempos de residência da água doce na zona de mistura (ou eventualmente de substâncias dissolvidas com características conservativas), em circulação nos canais poderá também permitir a calibração de modelos numéricos de dispersão espaço-temporal, quer de poluentes, quer de micropartículas transportadas em suspensão, designadamente de estádios larvares de vários organismos estuarinos.

Dá-se igualmente um contributo para a caracterização da distorção dos escoamentos no interior do estuário, através da sua quantificação, mas também com a sua diferenciação segundo as principais componentes intervenientes, designadamente o atrito de fundo e a distorção fluvial.

Determinam-se também taxas de transporte sedimentar de fundo em determinados sectores do estuário, e propõem-se modelos de circulação e do transporte sedimentar, a fim de se salvaguardar determinados quadros de circulação e de mistura das várias massas de água e dos sedimentos presentes no estuário. Esta informação poderá contribuir para uma melhor gestão das inevitáveis dragagens no sector portuário afim de salvaguardar a navegabilidade de navios de grande porte, bem como, contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos

na bacia do Mondego ao definir caudais do Mondego que salvaguardem a ocorrência de determinados quadros de circulação, mistura e de qualidade ambiental no estuário, onde se poderão incluir os caudais ecológicos.

Houve ainda a necessidade de determinar os impactes ao nível da hidrodinâmica e no transporte sedimentar resultantes de obras de regularização do braço norte contemporâneas às actividades de campo desenvolvidas no estuário. Para o autor também significou um irresistível desafio face às dificuldades inerentes ao estudo deste sistema, mas também por este apresentar um carácter pluridisciplinar, uma vez que a maior partes das actividades desenvolvidas decorreram no âmbito de projectos de investigação multidisciplinares.

Não se pretendeu produzir um trabalho de carácter teórico suportado em modelos numéricos, mas sim fundamentalmente baseado em informação de campo, que tenha sido o mais representativa da variabilidade natural do sistema.

Pretendeu-se também, que este trabalho passasse a constituir uma base de dados, inédita, permitindo que modelos teóricos ou de laboratório possam ser calibrados e ratificados com parâmetros físicos e sedimentológicos do estuário do Mondego, ou ainda, que modelos já testados e validados noutros sistemas costeiros similares, sejam ajustados e passem a abranger condições mais universais.

Também se entende considerar digno de registo, algumas actividades realizadas no âmbito deste trabalho, não só pelos escassos recursos humanos, de equipamento, e financeiros envolvidos, mas fundamentalmente pela simples e inovadora abordagem metodológica de campo adoptada. Realçam-se as campanhas de medição de vários parâmetros físicos e sedimentares realizados em diferentes sectores do estuário, abrangendo ciclos completos de maré, com recurso a uma embarcação. Consistiram basicamente em medições em vários pontos representativos das secções transversais dos canais, obedecendo a períodos de leitura irregularmente espaçadas no tempo, muito embora as várias séries de dados maregráficos que

compuseram cada campanha de campo, tenham sido obtidas em dias consecutivos, tornaram possível algumas correlações espaciais e temporais no estuário dos vários parâmetros em análise.

1.3. Objectivos do Trabalho

1.3.1. Objectivos Gerais

O presente trabalho pretendeu proceder ao estudo dinâmico-sedimentar do estuário do rio Mondego através da:

- avaliação dos volumes de água e das taxas de transporte sedimentar de fundo no estuário, e sua variabilidade espaço-temporal;

- definição da mistura, estratificação e circulação geral do estuário do Mondego;

- estabelecimento de relações entre a hidrodinâmica e o transporte sedimentar não coesivo de fundo;

- caracterização dos diferentes ambientes dinâmico-sedimentares;

- elaboração de modelos conceptuais de circulação e do transporte sedimentar para o estuário.

1.3.2. Objectivos Específicos

A indicação precisa de todos os objectivos propostos inicialmente, passou pela caracterização da:

- propagação e distorção dos escoamentos em diferentes sectores do estuário e suas relações com os principais processos físicos de transporte;

- caracterização da importância relativa de factores condicionantes da distorção dos escoamentos, nomeadamente do atrito de fundo, da distorção fluvial e aspectos fisiográficos;

- definição dos padrões gerais de circulação espacial das massas de água no estuário;

- quantificação dos volumes de água e de sedimentos em circulação no estuário e definição de tempos de residência;

- distribuição dos sedimentos superficiais no estuário e suas relações com a hidrodinâmica;

- descrição de ambientes dinâmico-sedimentares;

- identificação de impactes hidrodinâmicos e no transporte sedimentar resultantes da regularização do braço norte.

- classificação do estuário quanto aos processos de mistura envolvidos, estratificação de densidade, propagação e distorção da maré;

- definição de caudais mínimos do Mondego que assegurem no estuário determinados padrões de mistura e estratificação;

- estabelecimento de considerações sobre os locais onde eram emitidos resíduos urbanos ou industriais no estuário, com base nos tempos de residência calculados;

- fornecimento de elementos imprescindíveis para uma melhor gestão das inevitáveis e dispendiosos trabalhos de dragagem na zona portuária;

- elaboração de modelos conceptuais de circulação e do transporte sedimentar de fundo;

- funcionamento hidrodinâmico e sedimentar do estuário do Mondego e seu enquadramento no contexto de outros sistemas a nível global.

1.4. Estrutura geral do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em 6 capítulos e na parte final constam as referências bibliográficas citadas. A planificação global dos conteúdos das diversas partes explicam-se resumidamente de seguida.

O primeiro capítulo corresponde a um texto introdutório onde se justifica a escolha do tema em estudo, procedendo-se ao enquadramento teórico dos assuntos tratados, a uma síntese do estado actual dos conhecimentos onde e se definem os objectivos do trabalho. No segundo capítulo faz-se o enquadramento geográfico do estuário do Mondego à luz do

conhecimento actual e explanam-se os critérios usados para a delimitação da área de estudo. Descreve-se a fisiografia e a hidrodinâmica do estuário e faz-se um enquadramento geológico da sua bacia. No capítulo seguinte, procede-se a uma revisão conceptual da literatura relativa apenas aos tópicos abordados no trabalho ou em áreas afins às que estão a ser tratadas, diferenciando-se uma revisão da literatura da componente teórica de carácter mais conceptual, de uma síntese geral dos trabalhos realizados por outros autores no estuário do Mondego. A indicação do material e a descrição das técnicas utilizadas nos trabalhos de campo, e a justificação e exposição dos métodos usados nos tratamentos laboratorial e matemático dos dados, compuseram o quarto capítulo. Neste também se teceram considerações sobre a fiabilidade, validade dos métodos e dos erros associados.

No quinto capítulo descrevem-se os resultados obtidos recorrendo a ilustrações de figuras e a quadros considerados convenientes, sendo estes sujeitos a uma análise crítica, dando informações sobre a confirmação ou não das previsões iniciais. A lógica interna do trabalho determina a sequência dos assuntos abordados neste capítulo, começando-se por fazer no subcapítulo 5.1. uma análise à variação da superfície livre no interior do estuário. No subcapítulo 5.2 procede-se a uma análise de vários parâmetros fisiográficos nos diferentes sectores do estuário, avaliados os respectivos impactes na hidrodinâmica estuarina, e determinados os volumes geométricos em circulação. No subcapítulo 5.3 descrevem-se as principais propriedades dos escoamentos consideradas mais relevantes para o transporte sedimentar, e que também caracterizaram as diferentes massas de água e os processos de mistura. São apresentadas várias relações e tendências de variação estabelecidas entre vários parâmetros maregráficos e entre a distorção da maré com os principais agentes hidrodinâmicos, que foram representativas de uma variedade de amplitudes de maré e magnitudes de caudais fluviais, para diferentes sectores do estuário. São descritos os principais movimentos das massas de água no estuário e quantificados os respectivos volumes

em circulação. São determinados prismas de maré e tempos de residência para os diferentes sectores do estuário. É proposto um diagrama de circulação-estratificação para o estuário do Mondego.

No subcapítulo 5.4 são descritos os sedimentos desprovidos de propriedades coesivas da cobertura do fundo do estuário, quanto às propriedades mais relevantes para o transporte sedimentar e definem-se os principais domínios dinâmico-sedimentares. Segue-se-lhe a quantificação do transporte sedimentar de fundo em vários sectores do sistema, e sob vários quadros hidrodinâmicos de altura da maré e descargas fluviais. É proposto um modelo conceptual de circulação e do transporte sedimentar no estuário do Mondego.

No Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões do trabalho. Discutem-se os resultados obtidos por referência às hipóteses iniciais e tecem-se considerações sobre a validade dos resultados, bem como, sobre a legitimidade de possíveis generalizações, tendo em conta as circunstâncias da amostragem usada e metodologias seguidas. Apresentam-se as limitações do trabalho e considerações sobre o interesse e a novidade dos resultados obtidos, e a ligação entre os resultados verificados e o estado actual dos conhecimentos sobre a matéria em questão. Dão-se sugestões para a aplicação prática dos resultados obtidos e pistas para prosseguir com novas investigações. Por último, apresenta-se uma lista das fontes bibliográficas utilizadas no trabalho em questão, seleccionadas criteriosamente.

CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Enquadramento Geográfico do Estuário do Mondego

O rio Mondego nasce na Serra da Estrela a 1547 metros de altitude e percorre 227km até desaguar no Oceano Atlântico imediatamente a sul da cidade da Figueira da Foz sob a forma de um estuário de pequenas dimensões. Corresponde ao maior curso de água cuja bacia hidrográfica se situa totalmente em território nacional, com uma área de 6671km^2 e tem por principais afluentes os rios Alva, Dão, Ceira, Cernache, Ega, Arunca, Ançã, Foja e Pranto (Hidroprojecto, 1987; Direcção-Geral dos Recursos Naturais, 1988). A sua bacia hidrográfica com uma forma alongada, com eixo maior de direcção NE-SW, é limitada a norte pelas bacias hidrográficas do Vouga e do rio Douro, e a sul pelos rios Liz e Tejo (figura 2. 1). Segundo Lencastre (1980) a bacia hidrográfica do Mondego pode ser dividida em três sectores: a parte superior da bacia, situada a montante das barragens da Aguieira e Fronhas, com uma área de 3750 km^2 controlam 56% da área total da bacia; o sector compreendido entre estas barragens e o Açude de Ponte de Coimbra, com uma área de 1206km^2 e 18% da área total; e a zona a jusante de Coimbra, ocupando 26% da área total de 1714km^2 (figura 2. 1).

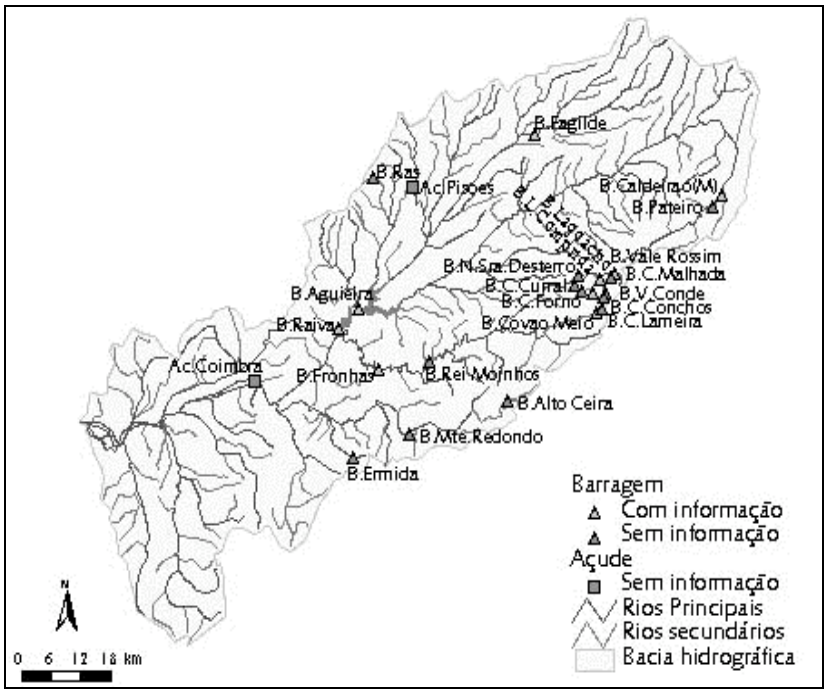


Figura 2. 1. Bacia hidrográfica do rio Mondego e localização geográfica das barragens e açudes. Imagem retirada do "*web site*" da Direcção Geral do Ambiente.

A montante de Coimbra o Mondego apresenta um leito encaixado, enquanto a jusante, desenvolve-se uma planície aluvionar denominada de "Campos do Mondego" ou "Baixo Mondego" com uma área de 15000ha, encontrando-se sujeita a inundações em média 40 dias por ano. O mesmo autor considera que o Mondego apresenta uma rede hidrográfica adaptada à geomorfologia da sua bacia, apresentando um perfil longitudinal do tipo em escada com a definição de quatro troços. O primeiro da nascente até à base da Serra da Estrela (ou "Alto Mondego") com um comprimento aproximado a 40km e com um declive médio de 25/1000, o segundo e terceiros troços com 105km e 51km, com declives médios de 4/1000 e 1/1000 definindo o Mondego Médio, e por fim o Baixo Mondego com um declive médio 0.5/1000.

O seu estuário enquadrou-se numa área ladeada a Oeste e a Este pelos meridianos -63500 e -41500 (coordenadas Hayford/Gauss Ponto Central) e compreendida a Norte e a Sul pelos paralelos 56500 e 49000, tendo os canais do estuário apenas representado 7.5%[1] desta área de forma rectangular, como se representa na figura 2. 2. Nos últimos 7.5km do seu troço o estuário desdobra-se em dois braços, o norte e o sul, os quais se voltam a unir junto à foz. É caracterizado por uma dinâmica muito complexa, com fortes variações espacio-temporais e claras alternâncias de caudais doces e salgados, este estuário constitui um sistema natural de interface, mas também de armadilha ao trânsito sedimentar (Reis & Duarte, 1990). Em resposta à crescente importância comercial do estuário e ao desenvolvimento geográfico, social e económico de toda a Zona Centro do país, tem-se implementado nas últimas décadas uma série de obras portuárias, de protecção costeira e de regularização estuarina que têm vindo a modificar irreversivelmente todos os seus domínios naturais e o seu funcionamento hidrodinâmico (Duarte & Reis, 1992). Paralelamente, todo o rio Mondego transporta uma grande carga poluente que é drenada para a sua bacia hidrográfica, funcionando aquele como um colector de esgotos de grandes centros urbanos e de efluentes industriais e agrícolas (Caetano, 1989).

[1]. Considerando a área plana de 12429051m^2 ocupada pelos vários canais do estuário.

2.2. Descrição Fisiográfica do Estuário

A análise morfológica e batimétrica do estuário teve por base vários levantamentos batimétricos ou coincidentes no tempo ou o mais próximos aos trabalhos de campo realizados. O levantamento batimétrico de 1991 (Direcção Geral de Portos, 1991) permitiu descrever a fisiografia da embocadura e do braço norte, enquanto o de 1988 (Direcção Geral de Portos, 1988) serviu de base à descrição do braço sul. Para o troço de canal compreendido entre os Cinco Irmãos e a cabeça do estuário, considerou-se o levantamento rectificado em 1982 (Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, 1976). Para a descrição fisiográfica do novo traçado do braço norte compreendido entre a Ponte da Figueira da Foz e os Cinco Irmãos resultante dos trabalhos de regularização que tiveram início em finais de 1993, recorreu-se ao levantamento da Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (1995). A descrição fisiográfica geral do estuário baseou-se na análise de troços de canal com características morfológicas e batimétricas semelhantes, tendo em consideração a informação constante nos referidos levantamentos, bem como, na bibliografia a referenciar. Encontra-se sintetizada nos quadros 2. 1 e 2. 2.

A zona costeira adjacente à foz do estuário encontrava-se definida por uma área relativamente plana, com cotas da ordem dos ≈-10mZH (figura 2. 2). A desembocadura do estuário apresentava-se voltada a Oeste e fixada por dois molhes exteriores, convergentes, com uma distância entre as suas cabeças de 320m. Prolongava-se para o interior do estuário por uma área de expansão da agitação marítima delimitada pelos molhes norte e sul, onde atingia uma distância máxima aproximada de 630m no alinhamento das duas praias internas (Porto Figueira da Foz, 1993). Estas duas praias internas ou protegidas encontravam-se localizadas lateralmente ao canal do Mondego, flanqueadas exteriormente pelos dois molhes externos da embocadura e interiormente por dois pequenos molhes internos, que se dispunham no seguimento das margens do canal principal do Mondego (figura 2. 2). Entre as cabeças dos dois molhes externos, a batimetria apresentava-se relativamente constante, com magnitudes da ordem dos ≈-6mZH, aumentando na

proximidade dos molhes, para cotas da ordem dos ≈-7mZH no sul, e dos ≈-10mZH no molhe norte. Para o interior da zona de expansão, a batimetria decresceu na direcção das duas praias internas, situadas a norte e a sul do canal central. Junto ao molhe norte foi identificado o local mais profundo de todo o estuário com uma cota de ≈-15mZH (Direcção Geral de Portos, 1991).

O sector da embocadura compreendido entre a zona de expansão e a entrada da Doca de Recreio e Serviços, foi definido por um troço de canal do Mondego completamente regularizado, de secção transversal do tipo trapezoidal e com um traçado longitudinal rectilíneo, perpendicular à linha de costa. Definido por uma largura mais ou menos constante de ≈170m e um comprimento de ≈570m (quadro 2. 1). O seu limite superior correspondeu à zona de bifurcação dos dois braços estuarinos, dos quais, o braço norte prolongava-se no seu seguimento longitudinal, enquanto o braço sul, apresentava uma posição periférica, desenvolvendo-se para sul na margem esquerda do canal do Mondego. A profundidade deste troço decresceu suavemente para montante, de cotas de ≈-7.8mZH na sua extremidade anterior para cotas da ordem dos ≈-6mZH, na posterior. As zonas mais profundas deste canal localizam-se preferencialmente no seu sector mais distal, junto à margem esquerda, com um registo de valores de ≈-11mZH, encontrando-se as restantes, praticamente representadas por extensas áreas planas, sempre imersas. As margens artificiais encontram-se forradas por um enrocamento e definem uma inclinação média de ≈23º. A Doca de Recreio e Serviços localizava-se na margem direita do canal do Mondego na zona de confluência destes dois braços, constituindo um ambiente periférico, antrópico, apresentando cotas da ordem dos -2.6mZH (figura 2. 2).

O segmento do braço norte compreendido entre a zona de bifurcação distal dos dois braços e o alinhamento N-S da Ponte Velha da Figueira da Foz (meridiano ≈-60600), definiu um troço do canal principal do Mondego de 1.3km de comprimento, com uma disposição rectilínea W-E, segundo o alinhamento do canal da embocadura (figura 2. 2). Apresentou uma secção transversal do tipo trapezoidal, de largura aproximada a 300m, que foi ligeiramente superior à verificada no

segmento de canal anterior. A sua batimetria decresceu para montante, de cotas da ordem dos ≈-4mZH, para cotas médias de ≈-1m no limite superior, apresentando um fundo muito plano. As cotas mais profundas localizaram-se junto à margem direita, em frente ao Cais comercial, com ≈-9mZH. Na sua margem direita localizava-se o Cais Comercial, zona de carga e descarga de navios comerciais, enquanto a esquerda dava acesso à Doca dos Bacalhoeiros.

Seguiu-se-lhe um troço de canal do braço norte muito curto, com ≈1.2km de comprimento, compreendido entre a ponte velha da Figueira e o alinhamento N-S, com origem a 220m a jusante da Estação da Fontela (meridiano ≈-59600), representado na figura 2. 2. Correspondeu a um segmento de canal rectilíneo de orientação aproximada W-E, muito pouco antropizado e com ≈360m de largura. O fundo apresentava-se muito regular, caracterizado por variações transversais e longitudinais da batimetria muito pequenas, compreendidas entre os -1.8mZH e os +0.4mZH, predominando cotas da ordem dos ≈-0.5mZH. Apenas sob a ponte nova da Figueira da Foz, este canal, para além de ter sido um pouco mais estreito (na ordem dos 300m de largura), apresentou uma variação batimétrica transversal significativa, com cotas compreendidas entre os -5.6mZH e os +0.1mZH, fundamentalmente resultante da interacção entre a hidrodinâmica deste sector estuarino com os pilares e estruturas de suporte envolventes da ponte. As margens deste sector do estuário eram artificiais revestidas por blocos de rocha nas imediações da ponte, ou constituídas por vaza ou depósitos antigos de dragados sustentados em estacas de madeira.

O restante segmento de canal do braço norte, compreendido entre o meridiano -59600 e a confluência jusante dos dois braços do estuário, nos Cinco Irmãos, correspondeu a um troço do canal principal com uma fisiografia muito complexa e pouco antropizada. Definiu um canal ligeiramente concavo, com uma orientação média longitudinal NW-SE, e com um comprimento aproximado a 3.7km. Correspondeu a um troço de canal mais amplo e menos profundo que o anterior, com uma largura média aproximada de 500m, e representado por extensos ambientes com cotas ≥+1.0mZH (quadro 2. 1). Contudo, apresentou uma grande variação da amplitude da

batimetria, definida nos extremos por estreitos canais sempre imersos que atingiram cotas de -4mZH frente à Metálica da Fontela e os -2mZH nos Cinco Irmãos, e por extensas áreas representadas por barras emersas aquando das baixa-mares, que atingiram cotas de ≤+2.2mZH, de acordo com o levantamento batimétrico da figura 2. 2. Nos ambientes marginais deste canal, foram cartografadas estreitas faixas de zonas lodosas (Direcção Geral de Portos, 1991) e zonas de sapal e de *Zostera Nolti* (Duarte & Reis, 1990; Direcção Geral de Portos, 1990), confinadas a ambientes resguardados e compreendidos entre as cotas +1.8mZH e +3.6mZH. Estas zonas de sapal foram fundamentalmente representadas por *Spartina marítima* (Curtis), por *Scirpus maritimus* e *Zostera Nolti*, tendo por base a identificação destas espécies em diversos sectores do braço sul, por Direcção Geral de Portos (1990), Castro & Freitas (2002); Flindt *et al* (2002); Lillebø *et al* (2002a); Lopes *et al* (2002) e Pardal *et al* (2002). Parte das margens deste troço de canal eram constituídas por sedimentos arenosos ou vasosos, ou por vaza sustentada por estacas de madeira, bem como, por um troço na margem direita frente à Metálica da Fontela, revestido por um paredão de enrocamento.

A montante dos Cinco Irmãos, o estuário foi representado pelo Leito Regularizado do Baixo Mondego que apresentou uma secção trapezoidal composta, formado por um leito menor por onde eram drenados os caudais dominantes, e por um leito maior para a drenagem dos caudais de cheia (Direcção Geral de Portos, 1990; Lencastre, 1992). Foi definido por um traçado longitudinal muito rectilíneo (à semelhança da classificação de Morisawa, 1985), com excepção para o troço compreendido entre os Cinco Irmãos e a Ponte de Caminho de Ferro de Lares que apresentou uma forma convexa. Este troço de canal estendeu-se até à cabeça do estuário, que de acordo com Duarte & Reis (1990), localizou-se no açude transversal de enrocamento situado 1km a montante da ponte da Granja do Ulmeiro, designado neste trabalho por açude da Granja do Ulmeiro, e que atingiu no seu topo uma cota de ≈+3.30mZH. O leito menor ou de estiagem, definiu nos seus 20.6km de extensão, um decréscimo gradual da batimetria para montante, de ≈-3.50mZH para ≈+1.26mZH, bem como, uma diminuição gradual da largura do canal, de 308m para ≈210m, entre os Cinco

Irmãos e junto ao açude da Granja do Ulmeiro, respectivamente. Já o leito maior (ou leito de inundação ou cheia) descreveu um aumento das cotas batimétricas para montante, de ≈+1.50mZH junto aos Cinco Irmãos, para os +5.80mZH na cabeça do estuário, bem como, um decréscimo da sua largura média, de 760m para os 340m (figura 2. 2 e quadro 2. 1). Comparativamente ao sector proximal do braço norte, este troço do estuário contíguo, representou um canal mais profundo, de batimetria regular e mais estreito para montante, definido praticamente por ambientes sempre imersos. As margens destes canais apresentaram uma inclinação da ordem dos 23º e encontravam-se forradas por blocos de rocha calcária, designadas pela Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (1976) de taludes com revestimento reforçado do tipo II.

No braço sul também foram identificados três troços de canal, igualmente designados de sector distal, médio e proximal, tendo por base as semelhanças observadas nas suas características morfológicas e batimétricas. O sector proximal, teve início na confluência jusante com o braço norte e estendeu-se até à ponte da Gala, definindo uma extensão de 1.3km. Expôs um troço de canal completamente regularizado com uma disposição longitudinal na sua parte inicial, ligeiramente curvada para SSE (representada por um eixo médio NNW-SSE), passando a apresentar uma orientação rectilínea, orientada para Sul, na sua parte terminal (figura 2. 2). Exibiu uma secção do tipo trapezoidal, com uma largura média de ≈200m, com margens regularizadas e revestidas por blocos de rocha calcária. Correspondeu a um sistema pouco profundo, cuja batimetria do fundo para além de ter sido muito regular, decresceu gradualmente para montante. Contudo, nas suas extremidades, registaram-se variações transversais da batimetria consideráveis, em resultado da interacção da hidrodinâmica local com as infra-estruturas portuárias ou com os pilares da Ponte da Gala. Desta forma, na confluência com o braço norte a batimetria oscilou entre os -4.1 e os -9mZH, enquanto sob a Ponte da Gala variou entre os ≈-9mZH e os +1.2mZH. Na zona de acesso ao Porto de pesca, na margem esquerda, registaram-se batimetrias da ordem dos ≈-5mZH.

A zona portuária do estuário foi representada basicamente pela embocadura e pelos sectores distais dos braços norte e sul, e têm vindo a sofrer uma forte intervenção antrópica, com

trabalhos regulares de dragagem afim de assegurar condições para a navegabilidade de embarcações de maior porte (Junta Autónoma do Porto da Figueira da Foz, 1993).

Quadro 2. 1. Síntese das características morfológicos, batimétricas e estruturais mais relevantes usadas na definição dos diferentes sectores do estuário do Mondego.

Troços de canal do estuário	**Sectores considerados**	**Descrição fisiográfica**
embocadura (E)	distal ou anterior (SDE)	Representado pela zona de expansão da agitação marítima, que apresentou uma forma em leque e era delimitada pelos molhes exteriores convergentes da foz do Mondego. Estes, descreveram uma distância de 320m entre as suas cabeças e uma largura máxima de 630m no alinhamento das duas praias internas. Entre as cabeças dos molhes a batimetria rondou os -6mZH, decrescendo para montante na direcção das duas praias internas. Apresentou uma cota máxima de ≈-15mZH junto à extremidade do molhe norte. Correspondeu a uma zona estuarina completamente antropizada, de interface com o mar.
	proximal ou posterior (SPE)	Canal regularizado de secção transversal trapezoidal, rectilíneo, com disposição perpendicular à linha de costa, compreendido entre a zona de expansão da agitação marítima e a bifurcação anterior do braço norte com o braço sul. Com a largura aproximada a 170m e um comprimento ≈570m, era definido por um decréscimo da batimetria para montante de ≈-7.8mZH para -6mZH. As suas margens apresentavam-se completamente regularizadas e revestidas por enrocamento. Representou um troço de canal mais estreito e mais profundo que o sector distal da embocadura.
braço norte (BN)	distal ou anterior (SDBN)	Canal regularizado, rectilíneo, orientado no seguimento longitudinal da embocadura, com 1.3km de extensão e uma largura da ordem dos 300m. O seu limite superior localizava-se 150m a jusante da Ponte actual da Figueira da Foz. A batimetria decresceu para montante de ≈-4mZH para ≈-1mZH. As suas margens apresentavam-se completamente regularizadas e revestidas por enrocamento. Correspondeu a um sector mais amplo e menos profundo que o proximal da embocadura.
	médio ou central (SMBN)	Segmento do braço norte, pouco antropizado, com ≈1.2km de comprimento, compreendido entre os meridianos ≈-60600 e ≈-59600. Apresentava uma orientação W-E e uma largura de ≈360m. Correspondeu a um sector muito pouco profundo, plano, com uma batimetria que rondou os ≈-0.5mZH. As suas margens apresentavam-se parcialmente regularizadas. Definiu um sector mais largo e menos profundo que o troço distal do braço norte.
	proximal ou posterior (SPBN)	Troço compreendido entre o meridiano -59600 e os Cinco Irmãos, definido por uma fisiografia muito complexa e pouco antropizada. Correspondeu a um canal de largura ≈500m, pouco profundo, mas que apresentou uma variação espacial da batimetria significativa, caracterizada por estreitos canais sempre imersos que atingiram os ≈-4mZH, e por extensos ambientes emersos durante as baixa-mares que alcançaram cotas de ≈+2.2mZH. Confinadas a zonas marginais ao canal principal, ocorreram estreitas faixas de sapal representadas fundamentalmente por *Spartina marítima*, *Scirpus maritimus* e *Zostera Nolti,* bem como, zonas lodosas, compreendidos entre as cotas +1.8≤h≤3.6mZH. As margens deste canal apresentavam-se pouco antropizadas. Este troço de canal correspondeu a um sector mais amplo e menos profundo que o sector médio do braço norte.
troço estuarino do Leito Regularizado do Baixo Mondego (LRBB)	troço de canal (LRBM)	Definiu um troço do canal principal do Mondego ainda sujeito à acção dinâmica da maré, compreendido entre os Cinco Irmãos e o açude da Granja do Ulmeiro. representou um canal completamente regularizado de secção trapezoidal composta, constituído por um leito menor e um leito maior ou de cheia, que apresentaram um desenvolvimento longitudinal muito rectilíneo. O canal de estiagem ostentou um decréscimo gradual da batimetria e da largura para montante, com valores de -3.50mZH e de 308m nos Cinco Irmãos, para valores de +1,26mZH e de 210m junto ao açude da Granja do Ulmeiro. As suas margens apresentavam-se completamente regularizadas. Relativamente ao sector proximal do braço norte, definiu um troço de canal muito mais estreito, mais profundo, e com uma batimetria longitudinalmente muito regular.
braço sul (BS)	distal ou anterior (SDBS)	Canal com 1.3km de comprimento, em que o seu limite a montante coincidiu com a ponte da Gala. Definiu um canal de secção trapezoidal completamente regularizado de largura ≈200m, pouco profundo, com batimetria muito regular e decrescente para montante. As suas margens apresentavam-se completamente regularizadas. Para além de ter ocupado uma posição periférica ao canal principal do Mondego, este troço de canal apresentou-se ligeiramente mais largo, mas muito menos profundo relativamente ao sector proximal da embocadura.
	médio ou central (SMBS)	Representou o sector compreendido entre a Ponte da Gala e um alinhamento transversal ao canal, próximo ao Esteiro dos Armazéns de Lavos. Correspondeu a uma zona estuarina pouco antropizada, ampla e muito pouco profunda. A sua largura decresceu para montante, de 810m para 350m. Foi representado por extensos ambientes emersos aquando das baixa-mares, definidos por amplas planícies de fundo, diversos canais de drenagem e zonas de *Spartina marítima* e de *Zostera nolti*. Os ambientes submersos, restringiram-se apenas a um estreito canal (de largura ≈45m) que se dispôs junto à margem esquerda deste troço do braço sul. Representou um canal muito mais amplo, mas muito menos profundo que o sector distal do braço sul.
	proximal ou posterior (SPBS)	Representou o segmento mais a montante do braço sul, numa das áreas menos antropizada do estuário. A largura e batimetria deste canal decresceram para montante, de valores de 250m para 150m e de +1mZH para +2.3mZH, respectivamente. Foi representado praticamente por ambientes emersos aquando das baixa-mares, com vastas áreas de sapal (com *Spartina marítima* e *Scirpus maritimus*), e extensas planícies de fundo, figuras de canal. As suas margens apresentavam-se pouco regularizadas.
Porto Pesca, Docas de Recreio e dos Bacalhoeiros	ambiente antrópico protegido (AE)	Corresponderam a estruturas artificiais de apoio a actividades antrópicas, que ocuparam áreas periféricas aos canais principais do estuário. Definiram ambientes protegidos, que englobaram também os canais de drenagem de salinas e de aquaculturas da ilha da Murraceira.

O sector médio do braço sul correspondeu a um troço de canal pouco antropizado, mais amplo e menos profundo que o anterior. Com início junto à ponte da Gala, a sua largura decresceu para montante, de valores de 810m, para os 350m no seu limite superior e que se localizou próximo ao Esteiro dos Armazéns de Lavos, de acordo com a figura 2. 2.

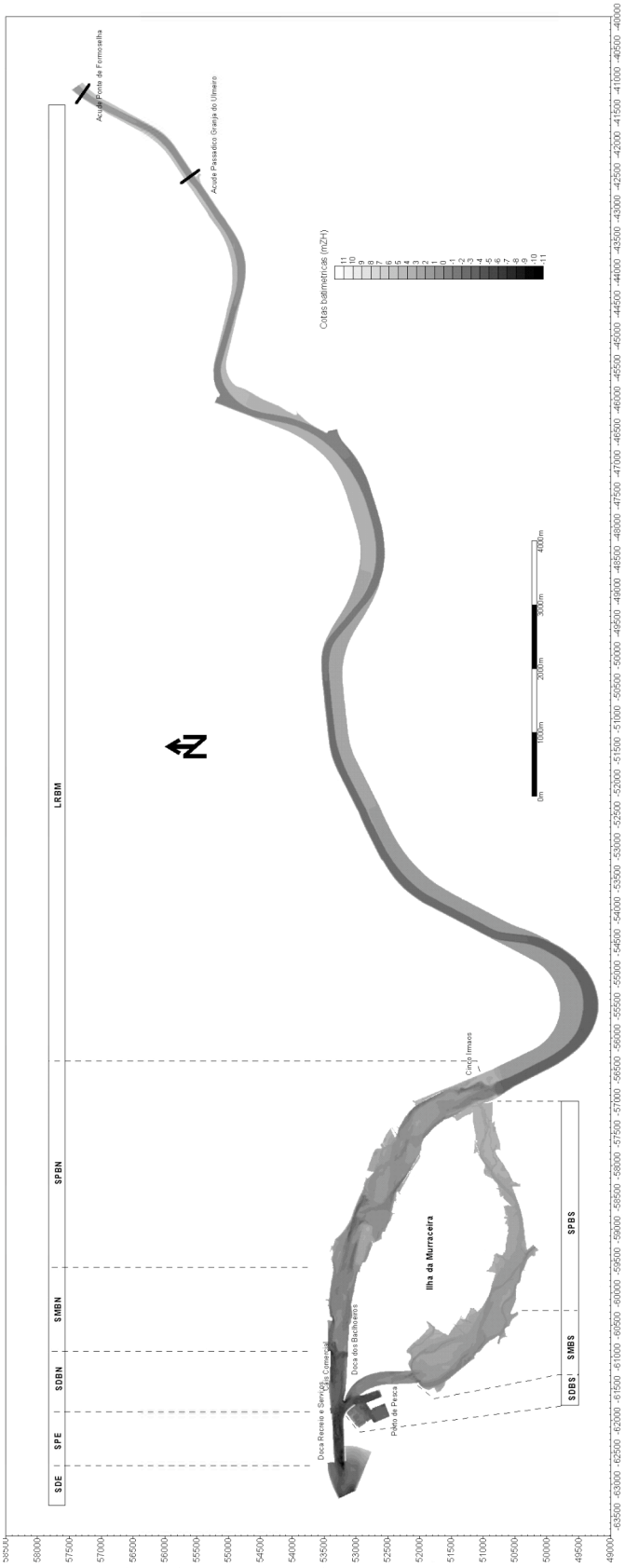


Figura 2. 2. Levantamento batimétrico do estuário do Mondego (já vectorizado), composto pela sobreposição dos levantamentos parciais dos troços: Cinco Irmãos-ponte de Formoselha (Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, 1976), pelo levantamento do braço sul (Direcção Geral de Portos, 1988) e pelo levantamento referente à embocadura e ao braço norte do estuário (Direcção Geral de Portos, 1991). (Este mapa é para ser impresso em tamanho A3).

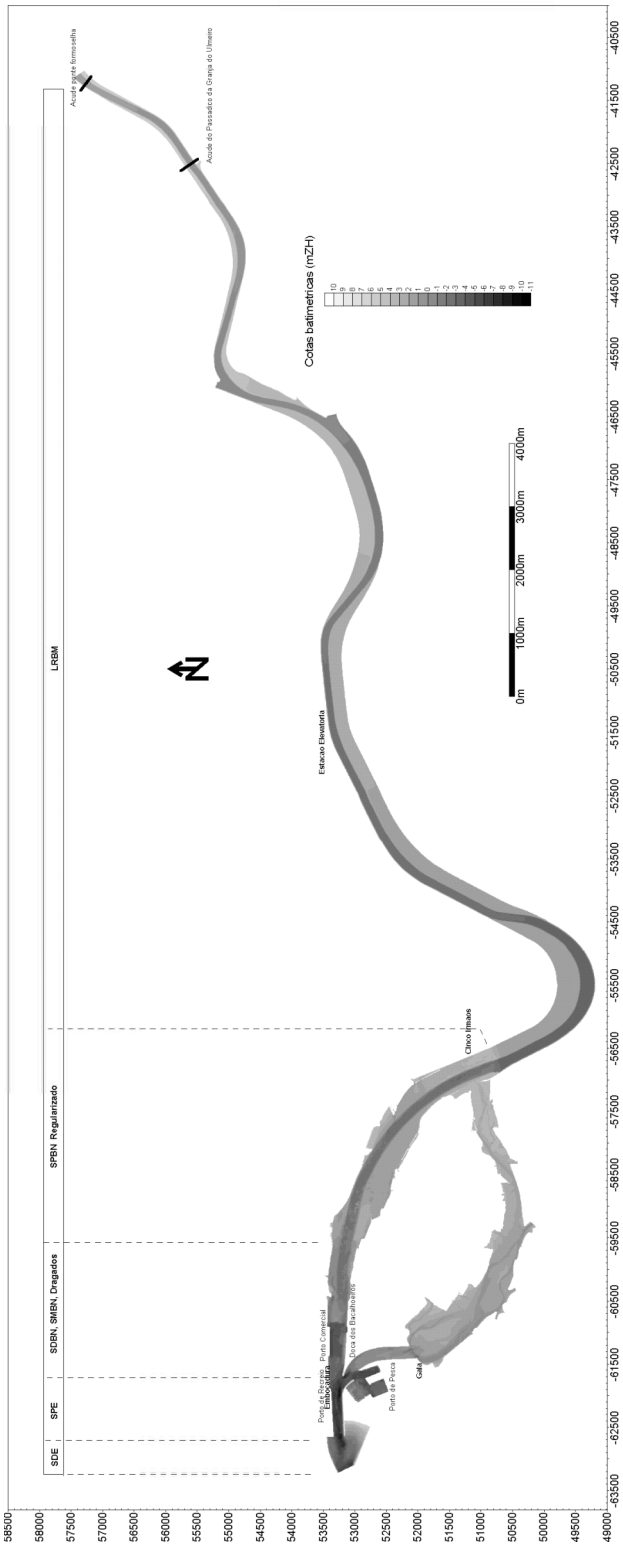


Figura 2. 3. Levantamento batimétrico do estuário do Mondego (já vectorizado), composto pela sobreposição dos levantamentos parciais dos troços: Cinco Irmãos-ponte de Formoselha (Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, 1976), pelo levantamento do braço sul (Direcção Geral de Portos, 1988) e pelo levantamento referente às obras de regularização do troço compreendido entre a Ponte da Figueira da Foz e os Cinco Irmãos, efectuado Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (1995). As siglas SDE e SME representam os sectores distal e proximal da embocadura, as siglas SDBN, SMBN e SPBN assinalam os sectores distal, médio e proximal do braço norte, a sigla LRBM representa o sector estuarino do Leito Regularizado do Baixo Mondego, e por fim SDBS, SMBS e SPBS representam os sectores distal, médio e proximal do braço sul. (Este mapa é para ser impresso em tamanho A3)

Ao contrário do sector distal, este segmento de canal foi definido por extensas áreas emersas aquando das baixa-mares, que lhe conferiram uma fisiografia muito complexa dada a grande diversidade de formas do fundo, nomeadamente com amplas planícies, com múltiplos canais de drenagem, zonas de sapal (Direcção Geral de Portos, 1990; Duarte & Reis, 1990). As zonas de sapal identificadas neste sector foram representadas fundamentalmente por *Spartina marítima* segundo Castro & Freitas (2002), Flindt *et al* (2002) e Lillebø *et al* (2002a) e uma pequena área de *Zostera Nolti* referenciada por Pardal *et al* (2002), distribuíram-se por cotas batimétricas compreendidas entre os ≈+1.8m e os ≈+2.6mZH (quadro 2. 1). Os ambientes sempre imersos restringiram-se apenas a um estreito canal (de 45m de largura) que se dispôs junto à margem esquerda deste sector do braço sul, e apresentou uma profundidade no seu leito central que rondou os ≈0mZH. Parte das margens deste troço de canal apresentavam-se revestidas por blocos de rocha calcária (ocupando grande parte da margem esquerda), encontrando-se as restantes, representadas por sedimento vasoso sustentado por estacas.

O sector proximal do braço sul correspondeu a uma das áreas do estuário menos intervencionada antropicamente, tendo estado compreendida entre o troço anterior e a conexão distal do braço sul com o braço norte, tendo definido um troço de canal com disposição longitudinal sensivelmente W-E (figura 2. 2). Este canal apresentava uma largura que decresceu para montante, de 250m para os 150m no seu limite superior, situado junto à confluência com o braço norte. Contudo, a conexão com o braço norte fazia-se principalmente por um estreito canal com ≈17m de largura e com uma cota máxima na sua parte central que rondou os +2.3mZH. A batimetria deste sector do braço sul também decresceu para montante, com valores aproximados a ≈+1mZH na sua extremidade jusante, para cotas de ≈+2.3mZH na confluência com o braço norte. Apresentou extensos ambientes sempre emersos aquando das baixa-mares, representados por vastas áreas de sapal dominadas por *Spartina marítima* e *Scirpus maritimus* (de acordo com Lillebø *et al,* 2002b), e por extensas planícies de fundo, figuras de canal, bem como, alguns retalhos de *Zostera Nolti*

(Duarte & Reis, 1990). Excepção para o troço de canal que dava acesso ao sistema de comportas da Quinta do Canal (rio Pranto), que exibia uma largura média de ≈50m, e encontrava-se praticamente representado por um canal sempre imerso, com uma batimetria que rondava os ≈0.0mZH na sua parte central, e exibia margens regularizadas com estreitos ambientes intermareais que continham pequenos retalhos muito dispersos de *Spartina marítima*. As margens do canal principal deste sector proximal do braço sul, eram constituídas fundamentalmente por sedimentos arenosos, por vezes sustentados por estacas de madeira, como também pontualmente, por blocos de rocha calcária. Os braços norte e sul, delimitaram longitudinalmente a norte e a sul, a ilha da Murraceira, de acordo com o mapa da figura 2. 2.

Em Setembro de 1993, iniciaram-se os trabalhos de regularização da Zona Estuarina de Transição, entre o troço terminal do Leito Regularizado do Baixo Mondego e o Porto da Figueira da Foz, que consistiu no prolongamento de regularização fluvial do leito central do rio Mondego ao longo dos sectores médio-proximal do braço norte. Pretendeu-se com esta obra, "assegurar a capacidade de vazão do Leito Regularizado do Baixo Mondego, por forma a que os caudais de cheia com período de retorno de 25 anos se escoem sem galgamento dos diques das zonas marginais, bem como, assegurar a continuidade da capacidade de transporte sólido do Leito Regularizado do Baixo Mondego, por forma a evitar a deposição dos sedimentos transportados de montante no troço terminal" (Direcção Geral de Portos, 1990). Procedeu-se desta forma à completa artificialização deste troço estuarino, transformando a sua secção transversal para um tipo trapezoidal composta, definida por um leito menor e por um leito de cheia, como se ilustra na figura 2. 3. Consistiu num estreitamento do canal de estiagem, para uma largura da ordem dos 170m e no rebaixamento da sua batimetria em toda a secção para cotas de ≈-2.5mZH. O leito de inundação passou a exibir uma cota média de ≈+2.3mZH e uma largura da ordem dos ≈430m na parte posterior do braço norte, enquanto na parte anterior do sector médio, cotas da ordem dos +1.4mZH e uma de largura de 560m (quadro 2. 2). Esta nova estrutura apresentou-se concordante e no

seguimento com o Leito Regularizado do Baixo Mondego, compreendido entre os Cinco Irmãos e a cabeça do estuário (figura 2. 3). A parte do braço norte representado pelo leito menor, passou a estar definido com uma batimetria do fundo regularizada, morfologicamente representada por extensas planícies sempre imersas, e por esporádicas barras ou zonas profundas de pequena dimensão. Enquanto o sector pertencente ao leito maior, passou a ser representado por uma extensa planície inundada nas fases terminais das preia-mares, principalmente aquando das marés vivas.

Quadro 2. 2. Características fisiográficas dos sectores do estuário sujeitos às obras de regularização do troço terminal do Leito Regularizado do Baixo Mondego, compreendido entre os Cinco Irmãos e o Porto da Figueira da Foz.

Troços de canal do estuário	**Sectores considerados**	**Descrição fisiográfica dos sectores médio-proximal do braço norte, após as obras de regularização**
braço norte (BN)	distal e médio (SDMBN)	Troço de canal parcialmente regularizado, sujeito a trabalhos de dragagem que foram precedentes e preparatórios ao novo traçado fisiográfico.
	proximal (SPBN)	Canal completamente regularizado de secção trapezoidal composta, com um leito menor e um maior, compreendido entre o cais Comercial e os Cinco Irmãos. O canal de estiagem apresentou uma largura média de 170m e uma batimetria média de ≈-2.5mZH, definindo um fundo plano, sempre imerso. O leito de inundação descreveu um decréscimo para montante da sua largura e da batimetria, variando de 560m para 430m e de +1.4mZH para +2.3mZH, nas suas extremidades anterior e posterior, respectivamente As suas margens passaram a apresentar-se completamente regularizadas. Relativamente ao sector proximal do braço norte, definiu um troço de canal de estiagem mais profundo, de batimetria regular, e muito mais estreito. Quando comparado com o troço estuarino do Leito Regularizado do Baixo Mondego, definiu um canal igualmente regularizado com a mesma batimetria e morfologia.

O sector médio do braço norte, aquando do levantamento batimétrico da Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (1995), muito embora não se apresentasse completamente regularizado com uma fisiografia do tipo trapezoidal, a sua batimetria já se encontrava antropizada devido aos trabalhos preliminares de dragagem, que se localizavam à data, em frente ao Cais Comercial, e que foram responsáveis por um aumento considerável da batimetria deste troço de canal, quando comparada com o levantamento precedente da Direcção Geral de Portos (1991). Aquele levantamento batimétrico também abrangeu a embocadura, tendo exibido para o seu sector proximal um aumento generalizado da batimetria. O sector distal da embocadura, comparativamente ao levantamento de 1991 não apresentou uma variação considerável da configuração e do valor das suas isóbatas (figuras 2. 2 e 2. 3).

O Porto Comercial encontrava-se localizado na margem Norte do braço norte, com uma estrutura em betão armado, com 462m de extensão, adjacente a fundos da ordem dos -5mZH. O Porto de Pesca, encontrava-se localizado na margem Sul do braço norte, representava uma área com 35000m^2 de área molhada, com cotas que rondavam os -2 a -6mZH. A Doca dos Bacalhoeiros,

localizava-se na margem Norte na Ilha da Murraceira, com uma área molhada de 19800m^2 e com uma cota máxima de -6mZH. O Porto de Recreio e Serviços localizava-se na margem Norte do canal principal do estuário, na zona de confluência entre os braços norte e sul. Era definido por uma área molhada de 50000m^2 e apresentava cotas batimétricas da ordem dos -4mZH (Baptista *et al*, 1995).

2.3. Principais Intervenções Antrópicas

As primeiras obras de regularização do leito do Mondego datam dos finais do século XVIII, com o desvio e a construção do actual "leito velho" sob a orientação do Padre Estêvão Cabral. Na década de sessenta, iniciaram-se as obras de regularização do actual leito do Mondego, inseridas no "Plano Geral do Aproveitamento Hidráulico do Rio Mondego", com o objectivo de uma utilização integrada dos recursos hídricos com a finalidade de produção energética, regularização fluvial, correcção torrencial, controle e defesa contra cheias, abastecimento de água às populações, reorganização da rede viária regional, valorização das componentes ambientais, piscícolas, recreativas e de apoio ao turismo (Direcção-Geral dos Recursos Naturais, 1968). Para tal, recorreu-se à construção de várias barragens, açudes e diques ao longo do seu curso, bem como, à total artificialização e desvio do troço fluvial referente aos últimos 40km, e à construção de uma série de canais secundários para abastecimento de água às indústrias e explorações agrícolas. As barragens da Aguieira e Fronhas foram edificadas com o propósito da defesa contra cheias, para rega e para a produção de energia eléctrica. A barragem móvel de Coimbra, denominada Açude de Ponte, *situ* à cota de 19m serve para regularização de parte dos caudais do Mondego e para rega. A correcção fluvial a jusante de Coimbra teve como propósito o controle de cheias, para a rega e enxugo dos campos do Mondego (Lencastre, 1980). O troço principal do canal do Mondego a jusante de Coimbra, de extensão de 35km, foi regularizado passando a apresentar um traçado mais rectilíneo e uma secção transversal composta. Apresenta-se constituída por um "leito menor" de forma trapezoidal com larguras variáveis entre 88 e 142m e profundidades compreendidas entre 3.7

e 4.5m entre Coimbra e os Cinco Irmãos, dimensionado para conter o caudal dominante que de acordo com Lencastre (1980) que é da ordem dos 340m^3s^{-1} em Coimbra e de 380m^3s^{-1} no estuário. O Leito Maior apresentou uma largura limitada por diques que variou entre os 112m e os 318m, respectivamente, e foi dimensionado para os caudais de cheia de 25 anos de 1200m^3s^{-1} em Coimbra e cerca de 3000m^3s^{-1} no estuário. Os principais afluentes do Mondego na zona do Baixo Mondego apresentam-se igualmente regularizados, afluindo na margem direita as ribeiras de Fornos e de Ançã e o rio Foja, enquanto na esquerda a ribeira de Cernache e os rios Arunca e Pranto. Um outro tipo de impacte antrópico que importa mencionar, relacionou-se com a intensa desflorestação ocorrida nos últimos séculos na bacia hidrográfica do Mondego e o consequente assoreamento do rio (Bettencourt, 1979; Matos, 1985). Como este novo traçado do rio no Baixo Mondego, que passou a ser designado de Leito Regularizado do Baixo Mondego (LRBM) e com a regularização dos seus principais afluentes, a contribuição detrítica por parte das formações geológicas aflorantes neste sector inferior da bacia hidrográfica para o rio, passou a ser muito reduzida, em função da impermeabilização implementada em todo o percurso fluvial e anulada a sua capacidade natural de formar meandros (Duarte & Reis, 1994; Baptista *et al*, 1995). A montante do LRBM, a construção de várias barragens e açudes, também passaram a ser responsáveis na redução da carga sólida que chega ao estuário em mais de 80% (Dias, 1990).

As primeiras obras de regularização do leito do Mondego também tiveram impactes no sector terminal do rio ao permitir uma maior libertação de sedimentos acumulados ao longo de séculos a montante de Coimbra, e desta forma contribuir para o assoreamento do sector estuarino. As primeiras obras de regularização do sector portuário remontam a 1837, na tentativa de dar resposta ao forte assoreamento e à grande mobilidade apresentada pela barra que punham em risco todo o comercio marítimo (Duarte & Reis, 1992). Contudo, seguiram-se-lhe outras intervenções na tentativa de minimizar a constante formação de grandes bancos de areia no estuário, e a formação de uma longa restinga de areia, que posicionava a embocadura mais a sul relativamente ao Forte de

Stª Catarina. Esta restinga, chegou a atingir comprimentos superiores a 1100 metros e taxas de crescimento da ordem das várias centenas de metros/ano, tendo sido alimentada por uma forte deriva litoral favorecida por batimetrias baixas (Abecasis *et al,* 1962; Abecasis, 1958; Duarte & Reis, 1992). Por não evidenciar morfologias erosivas no seu enraizamento, Abecasis & Matias (1973) sugeriram também ter estado associada a regimes fluviais do Mondego com fortes exportações de sedimentos. Duarte & Reis (1992) também relacionaram a formação destas restingas com uma grande disponibilidade de sedimento em deriva longilitoral, com uma actuação conjunta da maré e da agitação marítima, mas também relacionaram a acção da maré ou dos regimes de cheia sazonais do Mondego como responsáveis por se manter a embocadura aberta. Outras intervenções antrópicas representadas por acessos portuários e trabalhos de dragagens, introduziram alterações morfológicas nos canais que terão tido fortes impactes na hidrodinâmica e no transporte sedimentar neste sector estuarino a diferentes escalas, muito difíceis de quantificar e diferenciar (Duarte & Reis, 1992; Baptista *et al,* 1995).

Com a construção, no início da década de sessenta das infra-estruturas actuais da embocadura, a barra do Mondego foi estabilizada por dois molhes muito longos que desenvolvem quase perpendicularmente à linha de costa, e que interromperam a deriva litoral. Estes passaram a ser responsáveis em grande parte pela acumulação de sedimentos a barlamar do molhe norte e por uma forte erosão costeira a sotamar do molhe sul (Duarte & Reis, 1992). Simultaneamente, a construção de barragens e açudes ao longo da bacia hidrográfica ocasionou uma diminuição significativa da alimentação fluvial detrítica para o estuário (Dias, 1990), que conjugada com as obras portuárias de estabilização da embocadura, de protecção do litoral e de regularização dos canais principais, terão transformado o estuário do Mondego numa armadilha para os sedimentos, invertendo a tendência de alimentação detrítica para o meio marinho (Duarte & Reis, 1992). Embora a proliferação de obras de engenharia de protecção do litoral tenha contribuído para a crescente erosão neste troço costeiro, esta pode-se enquadrar numa fase de recuo generalizado da

linha de Costa Portuguesa. Resultante igualmente de uma forte diminuição do abastecimento de sedimentos à deriva litoral, quer por parte do Mondego, reduzindo em mais de 80% as suas contribuições de material detrítico para o mar, após as obras do Aproveitamento Hidráulico da sua Bacia hidrográfica, quer uma série de intervenções análogas, noutros rios e no litoral a norte da Figueira da Foz (Dias, 1990). Trabalhos de dragagem na zona portuária têm sido ciclicamente necessários para a manutenção da navegabilidade dos canais de embarcações de grande porte. A exploração de inertes na praia, destruição dos campos de dunas da praia da Figueira para fins de lazer e a sul da Cova, campismo, etc., e a elevação no nível médio das águas do mar, são factores igualmente relevantes neste processo (Williams *et al,* 1990; Dias, 1990).

Em meados de 1993 iniciaram-se as obras da última secção a regularizar o Baixo Mondego, correspondente ao troço de canal estuarino compreendido entre a ponte da Figueira da Foz e os Cinco Irmãos anteriormente descrito. Estes trabalhos consistiram no estreitamento e afundamento do troço de canal, tendo por objectivo principal, assegurar a continuidade do transporte de sedimentos fluviais afluentes à zona estuarina, e tentar evitar o seu assoreamento (figura 2. 3). Estes trabalhos foram contemporâneos com duas campanhas de campo efectuadas na estação dos Cinco Irmãos[2].

2.3.1. Fontes Poluidoras

A Figueira da Foz corresponde a uma cidade com uma população que varia sazonalmente entre as 30000 e as 50000 pessoas, e nela se desenvolvem um conjunto de actividades geradoras de impactes ambientais no estuário do Mondego, nomeadamente com descargas de efluentes domésticos parcialmente tratados, descargas de produtos químicos e de nutrientes provenientes das actividades agrícolas e industriais, designadamente de fábricas de farinha de peixe, aquaculturas e campos de orizicultura, bem como, impactes resultantes de actividades portuárias e piscatórias

[2]. Campanhas de 5I80893 e 5I141193.

(Guerreiro, 1984; Ministério do Plano e da Administração do Território, 1986; Caetano, 1989; Baptista *et al*, 1995).

As descargas de produtos químicos provenientes das actividades orizículas que se encontram localizadas na bacia hidrográfica do rio Pranto, entravam no estuário quer por via do braço sul através das comportas da Quinta do Canal, quer também lançados para o canal principal por intermédio da Estação Elevatória do Alqueidão. Fortes descargas orgânicas e de nutrientes também eram provenientes do esteiro do Armazéns (braço sul). Os aportes poluentes provenientes dos campos localizados nos pauis do Baixo Mondego chegavam ao estuário quer pelas descargas do rio Foja e do Leito Velho do Mondego aquando da abertura das comportas da Estação Elevatória do Foja, quer pelos caudais do Mondego provenientes do canal estuarino do Baixo Mondego que se desenvolve para montante daquela. As descargas de material poluente orgânico proveniente das aquaculturas localizadas na Ilha da Murraceira, eram lançados sensivelmente a meio da margem direita do braço sul e da margem esquerda do braço norte. Os caudais do Mondego que chegavam ao estuário, transportavam igualmente uma grande carga poluente que era drenada para a sua bacia hidrográfica, funcionando aquele como um receptor de esgotos de vários centros urbanos e efluentes industriais e agrícolas (Guerreiro, 1984; Ministério do Plano e da Administração do Território, 1986; Caetano, 1989). Os pontos de lançamento de águas residuais provenientes da cidade da Figueira da Foz localizavam-se no sector portuário, na margem Norte, distribuídos entre a Doca de recreio e o Cais comercial, enquanto no braço sul, o ponto de lançamento das águas residuais provenientes da Gala, localizava-se na margem esquerda, imediatamente a Sul da ponte da Gala (Baptista *et al*, 1995).

2.4. Descrição Hidrodinâmica e do Transporte sedimentar

2.4.1. Estuário

O estuário do Mondego nas últimas décadas tem vindo a sofrer uma forte pressão antrópica em resposta ao aumento populacional associado ao incremento das actividades portuárias e

pesqueira, as quais têm tido como resultado prático a necessidade de trabalhos de fixação da sua foz e de regularização dos seus canais (Direcção Geral de Portos, 1990). Dadas as suas reduzidas dimensões, as modificações profundas introduzidas por estas obras na sua morfologia, com a eliminação de múltiplos ambientes naturais, induziram desequilíbrios hidrodinâmicos e sedimentares, provocado efeitos irreversíveis em todos os seus habitats, tornando-o num sistema mais vulnerável às múltiplas influências e interacções dos complexos fenómenos naturais ali intervenientes (Reis & Duarte, 1990; Duarte & Reis, 1992).

Um dos impactes causados na hidrodinâmica do estuário com a actual fisiografia do sector portuário, traduz-se na produção junto ao Cais comercial do estuário de ondas[3] de altura compreendida entre os 3-5m, com rumos entre os 267°-302° e períodos de 11.5-17.5 segundos. Formadas apartir de vagas com rumos ao largo compreendidos entre SW e W, que interagiram com a morfologia do sector portuário (Almeida, 1992). Para estes rumos ao largo que apresentam uma frequência média de 49 dias/ano a agitação marinha propagou-se no interior do sector portuário, atingindo os sectores distais dos braços norte e sul. Constatou-se que a mareta é mais frequente e significativa nos meses de Novembro a Março, e apresenta uma maior expressividade durante as preia-mares (Almeida, 1992). Realçou-se igualmente com este estudo, que o actual traçado do sector portuário com uma disposição quase transversal à linha de costa encontra-se vulnerável à entrada das vagas com rumos ao largo do quadrante Oeste e SW, permitindo que estas entrem pelo canal principal da embocadura sofrendo uma baixa difracção ou refracção, causando sérios danos nos navios fundeados no Porto comercial (Almeida, 1992; Baptista *et al,* 1995). O trabalho realizado por aquele autor também realça que a hidrodinâmica do sector distal do estuário encontra-se muito regulada pela agitação marinha (mesmo após as obras de regularização), muito embora não tenham sido publicados os resultados referentes à propagação da agitação marinha neste sector do estuário sob rumos provenientes do quadrante NW.

[3]. Localmente designada de mareta.

Um outro tipo de vaga[4], definida por menores períodos (à escala do segundo) e comprimentos de onda, também se formou no interior do estuário aquando da interacção directa e localizada do vento sobre a superfície da água, quando esta apresentava uma corrente em sentido contrário (Open University Course Team, 1989). Esta agitação capilar, foi registada aquando de condições de vento moderado a forte com sentido contrário às correntes de maré, em troços de canal do estuário mais amplos, nomeadamente nos sectores médio-proximal dos braços norte e sul.

Direcção Geral de Portos (1990) tendo por base um modelo numérico desenvolvido para o estuário, fundamentado nas variações da superfície livre tabeladas pelo Instituto hidrográfico para o sector portuário, e em caudais do Mondego medidos no Açude de Ponte em Coimbra, definiu um regime de circulação e transporte sedimentar para o canal principal, tendo por base um levantamento batimétrico do braço norte já regularizado, e apenas considerando caudais fluviais médios diários do Mondego de 100, 400 e de 1000 m^3/s, quando aquele caudal não ultrapassa os $50m^3/s$ em cerca de 50% dos dias. Determinou que quer as correntes geradas após a regularização de todo o braço norte, quer a resultante do transporte sedimentar se passavam a fazer segundo o sentido rio->mar.

No âmbito desta tese de doutoramento foram publicados vários trabalhos, relativos à hidrodinâmica e ao transporte sedimentar no estuário do Mondego, aos quais se verificou a existência de comportamentos hidrodinâmicos distintos entre os braços norte e sul do estuário do Mondego, que resultaram, principalmente de um delicado balanço de forças entre as massas de água marinhas e fluviais (rios Mondego e Pranto), bem como, se verificou estarem relacionados com aspectos de natureza fisiográfica do estuário (Duarte & Reis, 1993). Constatou-se igualmente, uma diferenciação na circulação entre águas do rio Mondego, das as águas do rio Pranto, drenando as primeiras o canal principal enquanto o segundo rio drenou o braço sul. Para quadros hidrodinâmicos definidos por marés mortas e vivas sob moderados e elevados regimes fluviais,

[4]. Localmente designada de carneirada.

foram descritos quadros de mistura parcialmente misturados no canal principal e bem misturados no braço sul. Delimitaram os domínios marinho, fluvial e de mistura no canal principal e apenas os domínios marinho e o de mistura no braço sul, identificando características físicas e parâmetros sedimentológicos distintos entre as diferentes massa de água (Duarte & Pena dos Reis, 1993; Duarte (1994); Baptista *et al*, 1995).

Nos trabalhos de Duarte (1989), Duarte & Reis (1991a), Duarte & Reis (1991b) e Baptista *et al* (1995) é definida a distribuição espacial dos sedimentos da cobertura do fundo do estuário, tendo por base as características granulométricas, mineralógicas e texturais dos sedimentos. Foi identificada uma grande semelhança entre as areias marinhas em deriva longilitoral com os sedimentos dos sectores médio-distais dos braços norte e sul, e semelhanças com os sedimentos fluviais para as areias do sector proximal do braço norte. Parte do sector médio e proximal do braço sul foi caracterizado por sedimentos com características petrográficas peculiares. Foi relacionada a distribuição espacial e temporal deste sedimentos com a hidrodinâmica estuarina. Foram identificados vários ambientes e fácies sedimentares, tendo por base as características fisiográficas do estuário, características petrográficas dos sedimentos, as formas de fundo dos canais, dos ambientes dinâmicos e a diversidade biológica.

Quanto aos materiais transportados em suspensão no estuário Duarte *et al* (1991), num estudo preliminar identificaram diferenças na distribuição e na proveniência dos minerais de argila nos dois canais mais importantes do sistema. Verificaram que o material em circulação no estuário proveio fundamentalmente do transporte fluvial, identificando mesmo diferentes fontes de material argiloso. O Mondego transportava fundamentalmente a ilite, enquanto o Pranto a esmectite, os inter-estratificados ilite-esmectite e a caulinite.

Identificaram um défice de material detrítico de origem fluvial grosseiro no estuário, associando-o ao represamento a montante das barragens e açudes do Mondego, que foi compensado com a entrada de sedimentos de proveniência marinha para o sector distal do estuário. O défice de

material silto-argiloso também identificado no braço norte terá sido relacionada com o com a destruição antrópica dos ambientes intermareais naturais e das zonas de sapal, e com a maior penetração da maré para o interior do estuário (Reis & Duarte, 1990). Foram identificados outros impactes na hidrodinâmica e na circulação estuarina, resultantes da regularização do braço norte, entre a Zona Estuarina de Transição entre o Porto da Figueira de Foz e o Troço Terminal de Regularização do Baixo Mondego (Duarte & Reis (1994).

Duarte *et al* (2000) apresenta um estudo relativo à propagação não linear da onda de maré e à circulação hidrodinâmica no estuário do Mondego, constatando que para um determinado quadro hidrodinâmico, definido por baixos regimes fluviais, a distorção dos escoamentos medida ao longo do estuário relaciona-se fundamentalmente com o atrito de fundo, e que o sistema se comporta como um estuário de domínio da enchente. Foram registadas assimetrias quer na componente vertical, quer na horizontal da maré, as quais tenderam a ser mais elevadas para o interior do estuário.

2.4.2. Troço Fluvial Adjacente ao Estuário

De acordo com Lencastre (1980) o rio Mondego foi representado por um regime hidrológico muito irregular com características sazonais, definindo por um semestre considerado seco (de Abril a Setembro) e o resto do ano, húmido. Entre Dezembro e Março ocorrem os maiores caudais, enquanto os menores entre Junho e Setembro. O escoamento acumulado no semestre húmido foi em média superior a 70% do escoamento anual. Estas características hidrológicas mantêm-se mais ou menos constantes de ano para ano. A irregularidade do seu regime hidrológico após os trabalhos de regularização fundamentou-se em caudais de estiagem da ordem dos $10m^3s^{-1}$ durante a época estival e mais de $1200m^3s^{-1}$ durante a cheia de Dezembro de 1989 (Baptista *et al,* 1995). No entanto antes da regularização, os caudais de estiagem eram inferiores a $1m^3s^{-1}$ e os de cheia da ordem dos $3000m^3s^{-1}$ (Direcção-Geral dos Recursos Naturais, 1968). Contudo, tais regimes de cheia nunca perduram muito tempo (Loureiro & Pinto, 1981; Ribeiro *et al,* 1987). Por regra, os maiores caudais

ocorrem durante o Inverno (Dezembro a Fevereiro), havendo contudo anos de excepção (como é exemplo os anos de 88/89 e 90/91). Por vezes pode ter um comportamento bimodal, que não deixa de estar associado ao facto de os seus caudais estarem regulados por um conjunto de barragens e açudes a montante (Baptista *et al,* 1995). As cheias do Mondego encontram-se associadas a elevados níveis pluviométricos resultantes quase sempre de rosários de depressões que produzem chuvas prolongadas durante vários dias (Ribeiro *et al,* 1987). A bacia hidrográfica a montante de Coimbra, apresentava características geológicas que lhe conferiam grande impermeabilidade, bem como, vales alcantilados, declives acentuados e pouco revestidos de vegetação. Estes aspectos quando associados à baixa evaporação e a solos sobresaturados de água durante o Inverno, favoreceram uma rápida drenagem superficial das águas pluviais no Alto e Médio Mondego, que representa 74% da bacia hidrográfica. Este sector da bacia encontrava-se controlada por um conjunto de mais de 22 barragens e açudes (Lencastre, 1980). Estes elevados escoamentos quando são drenados para a vasta planície do Baixo Mondego, dadas as características da rede de drenagem, provocaram grandes acumulações de água com consequências tão catastróficas para as populações, as cheias (Loureiro & Pinto, 1981). Esta parte inferior da bacia representava os restantes 26% da bacia em que o canal principal do Mondego apresentava um traçado longitudinal de aproximadamente 40km completamente regularizado, com um declive médio de apenas 0.5/1000, e os seus principais afluentes também se encontravam regularizados (Lencastre, 1980). As cheias do Mondego podem ser diferenciadas em função dos caudais e do período de ocorrência, com as de quarto de século a apresentarem caudais da ordem de $3000m^3s^{-1}$, e milenárias da ordem dos $5000m^3s^{-1}$, definindo-se intermediamente as cheias de meio século e as centenárias (Lencastre, 1979; Lencastre, 1980). A regularização da bacia hidrográfica traduziu-se no estuário por uma grande regularidade temporal na magnitude dos caudais fluviais do Mondego, com a correcção dos picos de cheia, e numa redução considerável dos aportes de material detrítico que chegam ao sistema, fundamentalmente relacionado com o represamento da carga sólida ao longo do percurso

médio e superior do rio, entre outros (Reis & Duarte, 1990; Taborda & Dias, 1992; Baptista *et al,* 1995). A quantidade de água fornecida ao estuário passou a ser condicionada primeiramente pela abertura das comportas das barragens e açudes e a uma menor escala, dependente da interacção das condições climáticas, das características dos solos, da cobertura vegetal, da ocupação urbana, agrícola e industrial, evapotranspiração, infiltração, etc., decorrente na bacia hidrográfica do Mondego. Os fenómenos de evaporação, precipitação e percolação representaram uma componente pequena para o balanço de água doce no sistema, de acordo com Miranda *et al* (2002).

As descargas do Mondego representaram a principal fonte de água fresca, mas também de substâncias orgânicas, inorgânicas e de poluentes para o estuário, como forneceram sedimentos provenientes da meterorização da bacia hidrográfica do Mondego (Ferreira & Cunha, 1970; Direcção Geral de Portos, 1990). As diferentes contribuições relativas dos principais afluentes do Baixo Mondego na zona estuarina, de acordo com Baptista *et al* (1995) terão sido da ordem dos 6.63% para o Arunca, dos 1.28% para o Ega, dos 1.58% para o Pranto, dos 0.55% para o rio Foja enquanto as descargas medidas no Açude de Ponte em Coimbra terão contribuído em cerca de 89.96%, considerando o ano hidrológico de 1988/89 (figura 2. 4).

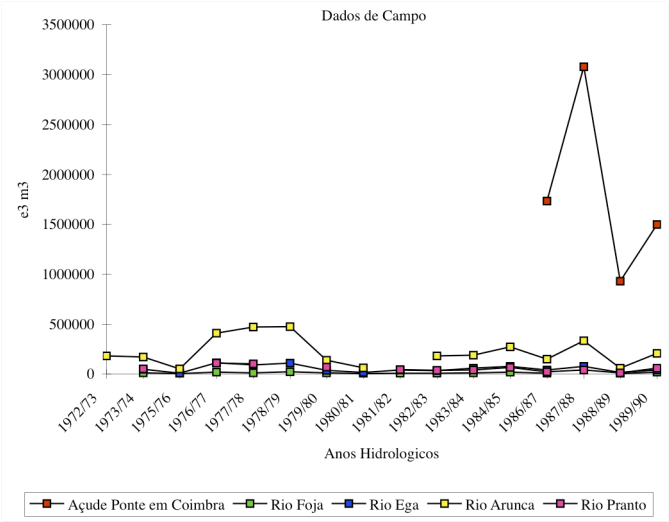


Figura 2. 4. Caudais totais anuais dos principais afluentes do Mondego no Baixo Mondego tendo por base os registos hidrológicos dos anos de 1973 a 1990 para as estações limnigráficas do Açude de Ponte de Coimbra, da estação da Ponte do Casével (rio Ega), da estação da Ponte Mocate (rio Arunca), da estação do casal da Rola (rio Pranto) e da estação da Ponte de Azenha Nova (rio Foja). Os caudais medidos no Açude de Ponte em Coimbra contribuíram para o caudal escoado na zona estuarina em cerca de 89.96% (≈90%), enquanto o Arunca em 6.63%, o Ega em 1.28%, o Pranto em 1.58% e o rio Foja em 0.55%, para o ano hidrológico de 1988/89. Retirado de Baptista *et al* (1995).

Uma vez que estes resultados corresponderam a um ano hidrológico contemporâneo aos trabalhos de campo realizados no âmbito deste trabalho, extrapolaram-se os caudais dos principais afluentes no sector estuarino apartir dos caudais conhecidos no Açude de Ponte em Coimbra, quando não foi possível determiná-los localmente. O rio Pranto para além de uma contribuição no caudal fluvial total do estuário bastante constante, apresentou um comportamento anual sazonal e irregular, mas muito semelhante ao do Mondego. Foi definido por oscilações compreendidas entre os 1.64% em 1986/87, os 1.57% em 1987/88 e os 1.58% em 1988/89 (Baptista *et al,* 1995), muito embora os seus caudais fluviais estejam regulados por um sistema de comportas na Quinta do Canal para o braço sul, e por um sistema de condutas para o braço norte na Estação Elevatória do Alqueidão (Direcção Geral de Portos, 1990). A abertura das comportas para o braço sul restringiu-se praticamente aos meses de maior pluviosidade, e neste caso efectuou-se apenas nas fases de vazante e princípios da enchente, evitando assim a entrada da maré salina para montante daquelas estruturas.

2.4.3. Zona Costeira Adjacente à Foz do Estuário

De acordo com Sauvaget *et al* (2000) na zona costeira adjacente à figueira da foz a maré foi praticamente definida por correntes oceânicas de origem astronómica, que constituiu a maior fonte do fluxo barotrópico. Consideraram que para além de esta onda ter sido também amplificada ao longo da plataforma continental, tenha sofrido a interacção de marés internas geradas durante o verão pela termoclina, bem como, o movimento de massas de águas profundas mais densas oriundas do estreito de Gibraltar. Segundo os mesmos autores, a onda de maré na costa Oeste Portuguesa ter-se-á propagado de Sul para Norte, com uma direcção quase paralela à linha de costa, e com uma direcção sensivelmente de SW na zona costeira adjacente à foz do Mondego. Estimou

também que a amplitude da maré astronómica mais elevada[5] não excedeu os 2 metros, e atingiu o seu valor mais elevado próximo à costa. Permitiu a definição de um regime de maré do tipo mesomareal *sensus* Davies, 1964, Davis & Hayes (1984), apresentando uma amplitude média anual de 2.06 metros e uma amplitude máxima anual de 3.67 metros (Junta Autónoma do Porto da Figueira da Foz, 1993). Quanto às correntes, determinou que a velocidade máxima para a maior maré astronómica na zona costeira adjacente ao estuário não excedeu os $0.5ms^{-1}$ e que as correntes ao largo da Figueira da Foz apresentam uma elipticidade[6] muito próxima de 100%. Baptista (1988) considerou que para além da maré, a circulação hidrodinâmica da zona costeira adjacente ao estuário terá estado dominada por uma combinação de correntes resultantes da acção do vento e por correntes gerais oceânicas. Baptista *et al* (1990) e Sauvaget *et al* (2000) definiram para esta zona costeira, uma onda de maré dominada pela componente semidiurna M_2 que apresentou uma amplitude de quase 1m, e a energia transferida para as componentes sub-harmónicas (M_4, M_6, ...) foi muito baixa.

O conhecimento da agitação marinha ao largo da foz do estuário torna-se da maior importância, por esta condicionar fortemente a dinâmica e o transporte sedimentar do seu sector distal (Reis & Duarte, 1990; Duarte & Reis, 1991a). A penetração daquela no interior do estuário encontra-se relacionada com a amplitude e direcção de propagação da agitação marinha ao largo, bem como, com a configuração e extensão dos molhes da embocadura, com a batimetria e a fisiografia deste sistema costeiro pouco profundo (Santos *et al*, 1989, Almeida, 1992). Com base na análise anual da agitação marítima ao largo da foz do Mondego efectuada por Baptista *et al* (1995), definiu-se que os rumos da agitação que atingiram a embocadura, e oscilaram entre 222° e os 302° (SW a ≈WNW), com um rumo médio de 273° (de W). Quanto à altura significativa, o valor médio[7]

[5]. Correspondendo ao valor obtido pela adição das amplitudes de todas as constituintes as 17 constituintes calculadas pela análise harmónica efectuada pelo modelo numérico de diferenças finitas para a plataforma continental Atlântica da Península Ibérica.
[6]. Sauvaget *et al* (2000) considerou a elipticidade da corrente ao longo de um ciclo completo de maré, como o quociente entre as correntes máxima e mínima, em percentagem.
[7]. Tendo em consideração os valores não nulos.

foi da ordem dos 1.8m e o valor máximo não ultrapassou os 7.5m. A série de dados analisada permitiu definir que cerca de 18% das ocorrências corresponderam a "mar calmo", 17% representam "mar chão", e 0.7% a alturas significativas compreendidas entre os 0-0.5m. A análise das alturas significativas determinou que a classe mais frequente correspondeu à de 1-1.5m com 24%, seguida da classe de 1.5-2m com 18.6%, a classe de 0.5-1m apresentou 14.5%, e a de 2-2.5m com 10.2%. Estes autores definiram que 13.4% da agitação marítima representou um grupo de transição do estado "normal" para o "alteroso", com 2.5-5m, e perto de 43% da agitação apresentou uma altura significativa compreendida entre os 1-2m, com rumos predominantes de 267-282° (≈W) e períodos mais frequentes de 7-11 segundos. Cerca de 67.5% da agitação apresentou alturas significativas compreendidas entre os 0.5-2.5m e com rumos predominantemente de 267°-282°[8] (W-WNW) e períodos mais frequentes de 7-13 segundos. Os rumos de SW-WSW (222°-252°) apresentam uma baixa frequência. As situações de temporal corresponderam a valores de alturas significativas de 5-6.5m, e apresentam uma probabilidade de ocorrência de ≈2% (≈7dias/ano) com os rumos entre 247°-282° (WSW-WNW) e períodos geralmente de 13 a 18 segundos. Situações de temporal extremo com alturas significativas de 6.5-7.5m apresentaram uma periodicidade de 0.12%, com rumos de 262°-277° (≈W) e períodos que oscilam entre 13 e 19 segundos. Para estes quadros tempestuosos[9] tornou-se evidente a desprotecção do sector distal do estuário principalmente à agitação de WSW e de W.

A agitação marítima apresentou também uma sazonalidade definida por maiores alturas para rumos predominantes de W e de SW durante o Inverno, e alturas moderadas a baixas com rumos predominantes de W e NW na época estival (Carvalho & Marcelo, 1966). O quadro da agitação de Verão segundo Baptista *et al* (1995) pode ser caracterizado com mais pormenor, por 27.8% das situações terem correspondido a calmas, assim como, 23% das ocorrências a alturas significativas

[8]. Em que as classe mais frequentes foram a 272°-277° com 28.7%, seguida da 267°-272° com 20.1%, e da 277°-282° com 16.2%.
[9]. Caracterizados por uma agitação com uma altura significativa superior a 5m e rumos de 247°-282°.

de 0-1m, e 97.7% da agitação ter apresentado alturas significativas inferiores a 2.5m. A altura significativa média foi da ordem dos 1.3m, e a probabilidade de ocorrência de temporais de 0.28%. Perto de 30% da agitação apresentou rumos de 277°-297° (agitação de W-WNW), enquanto 68.2% da agitação apresentou alturas significativas de 0.5-2.5m, com rumos de 262°-292° (W-WNW) e períodos de 7-11s. O quadro de Inverno foi caracterizado por apenas 7% de calmas e 9.8% de situações apresentam alturas significativas compreendidas entre 0-1m. Cerca de 70% da agitação apresentou alturas significativas inferiores a 2.5m e o seu valor médio anual foi de 2.2m. A probabilidade de ocorrência de temporais (alturas de 5 a 7.5m) foi de 2.6% apresentando rumos 262°-282° e períodos essencialmente compreendidos entre 13-19 segundos. A classe de rumos mais frequente correspondeu à de 267°-272° com 28.1% das ocorrências, com um rumo médio a 271° (de W). A agitação de SW foi significativa (ao contrário do Verão que foi de W-NW). Perto de 63% da agitação apresentou uma altura significativa de 0.5-2.5m, com rumos de 257°-282° e períodos de 8-13s (Carvalho & Marcelo, 1966; Baptista *et al,* 1995).

Nos períodos de transição correspondentes à Primavera e ao Outono, a agitação foi caracterizada por regimes intermédios aos descritos anteriormente, com 15.7% das situações terem correspondido a calmas, e 12.9% da agitação apresentou uma altura significativa de 0-1.0m. A altura significativa média da agitação foi de 1.7m, e cerca de 87% apresentou-se inferior a 2.5m. A agitação marítima apresentou um leque de rumos que variaram entre os 222° e os 297° (SW-WNW), sendo a orientação média de 273.5° (≈W). Perto de 71% da agitação apresentou alturas significativas de 0.5-2.5m, e rumos mais frequentes de 262-287° (W-WNW) com períodos de 8-13.5s. A probabilidade de ocorrência de temporais nestas estações do ano foi de apenas 0.78%, apresentando rumos de 252°-277° (WSW-W) e períodos de 14-25s. Os piores temporais registados ocorreram durante este período, com alturas significativas de 6.0-6.5m e rumos de W-SW (Baptista *et al,* 1995).

Segundo um ponto de vista energético, esta zona costeira adjacente à foz do Mondego foi dominada quer pela agitação marinha, quer pela maré, podendo ser classificada como um troço de costa de energia mista, ou também por uma costa de transição entre o domínio da agitação marítima e o da maré de acordo com Hayes (1979 *in*, Allen 1997), considerando uma altura média da agitação marinha de 1.8m e uma altura média da maré de 2.01m.

Zona costeira adjacente ao estuário pode ser caracterizada por praias de areia média, essencialmente abastecidas por uma deriva longilitoral fundamentalmente proveniente de Norte. As correntes de deriva longilitoral deslocam-se ao longo da costa, fora da zona de rebentação, predominantemente de Norte para Sul, neste sector costeiro (Abecassis *et al*, 1962). Os molhes da embocadura do Mondego são responsáveis pela deflexão das correntes de deriva, quer para o largo (Dias, 1990), quer para o interior do estuário[10] (Duarte & Reis, 1991a), reduzindo igualmente a alimentação de sedimentos em trânsito pelo litoral para as praias a sotamar da embocadura, com a sua deposição em sectores profundos da plataforma, bem como, com a sua retenção no interior do estuário (Duarte & Reis, 1992). As estruturas com um desenvolvimento perpendicular à linha de costa[11] interferem com a agitação e as correntes marginais marinhas, no sentido da diminuição efectiva da sua capacidade de transporte, constituindo uma obstrução artificial à deriva longilitoral. Tal efeito, reflectiu-se num aumento exagerado da deposição de areia a barlamar[12], de que é exemplo o extenso areal da Figueira da Foz (Abecasis & Matias, 1973; Duarte & Reis, 1992). Este défice de sedimentos em deriva para o litoral sul (praia a sotamar), torna a acção dos agentes dinâmicos marinhos mais agressiva perante a costa, com maior capacidade de remobilização e transporte de areia, ficando a praia mais estreita e cada vez mais vulnerável ao impacto hidrodinâmico (Dias, 1990), tal como se constatou no litoral adjacente à povoação da Cova. Na

[10]. Na extremidade do molhe norte constata-se uma dinâmica muito forte que inflecte para o interior do estuário, traduzida por cotas batimétricas da ordem dos -15mZH, localizadas na frente à cabeça deste molhe, e caracterizadas por fortes oscilações anuais.
[11]. De que são exemplo os molhes da embocadura e os esporões da praia da Gala.
[12]. Neste caso, corresponde à praia imediatamente a norte da estrutura.

tentativa de minorar tal situação, recorreu-se à construção de dois paredões longitudinais e um campo de esporões (Abecasis & Matias, 1973).

2.5. Enquadramento Geomorfológico do Baixo Mondego

O sector da bacia hidrográfica do rio Mondego circunscrita à Orla Meso-Cenozóica Ocidental portuguesa, é caracterizada por uma série de formações geológicas cujas características litológicas e/ou estrutura geológica condicionam fortemente a morfologia desta região (Soares *et al,* 1989). O Baixo Mondego encontra-se implantado na Orla Meso-Menozoica Ocidental Portuguesa, que representa cerca de 30% da área total da hidrográfica do Mondego, enquanto os restantes 70% localizam-se a Montante de Coimbra e são representados pelas formações geológicas da Meseta ou do Maciço Antigo. O maciço Antigo é fundamentalmente constituído por maciços graníticos e dioríticos e pelo Complexo xisto-grauváquico ante-Ordovícico e séries metamórficas, e junto ao contacto com as formações Meso-Cenozóicas apresenta estreitas faixas de formações xistosas e de uma formação metamórfica do Complexo Critalofílico. O Baixo Mondego é fundamentalmente constituído por Arenitos vermelhos que fazem a transição entre a Meseta e a Orla, por calcários, margas e arenitos do Mezozoico, conglomerados e aluviões do Terciário Superior e do Quaternário (Serviço Cartográfico do Exército, 1966; Bettencourt, 1979; Veloso, 1990).

As unidades geomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Mondego respeitante ao Maciço Hespérico, não serão abordadas, apenas as do Baixo Mondego, encontrando-se as primeiras representadas pelo Maciço Marginal de Coimbra, e pela Serra do Espinhal. A morfologia da região em estudo, não apresenta grandes acidentes orográficos, tratando-se de uma paisagem complexa, «... que em termos gerais, poder-se-ão definir, como ponto de partida para a análise da paisagem no Baixo Mondego, quatro grandes unidades morfológicas, sem que para isso signifique, para cada uma delas, clara homogeneização paisagística e/ou mesmo morfológica: as serras e planaltos calcários, as colinas gresosas, a planície aluvial e planície litoral» (Almeida *et al* 1990).

Serras e planaltos calcários, que correspondem a relevos de origem estrutural, formados essencialmente em rochas carbonatadas, (calcários, calcários dolomíticos ou calcários margosos) que se comportam como "rochas duras", apresentam uma maior resistência à erosão mecânica, quando comparadas a outras formações geológicas que compõem a bacia hidrográfica do Mondego da Orla Meso-Cenozóica Ocidental (figura 2. 5). Segundo Almeida *et al* (1990) "A presença de rochas calcárias e, sobretudo dos calcários mais puros e maciços tem reflexos imediatos na morfologia, não só pela sua maior resistência mecânica, o que em associação com a tectónica que os afecta, erguendo-os na maior parte dos casos, os torna salientes na paisagem, mas também pela morfologia de pormenor que, associada a processos de natureza cársica, assume um carácter particular". Assim, as macroformas de relevo evidenciadas por estas formações calcárias Jurássicas e Cretácias, correspondem fundamentalmente a um conjunto de serras, colinas e planaltos, das quais, a mais importante, dada a sua extensão e complexidade, se realça o afloramento calcário das Serras de Condeixa-Sicó-Alvaiázere, ocupando geograficamente o sector Sudoeste e Este desta sub-bacia. A norte do Mondego, este relevo perde expressão (menores cumeadas) dado que, os calcários são menos puros, apresentando uma litologia calco-dolomítica a margo-calcária, fortemente condicionada por falhamentos conjugados (NE-SW), de que são exemplos as Serras de Brasfemes e do Alhastro (Almeida *et al,* 1990). Para o sector ocidental, a forma de maior cumeada corresponde à Serra da Boa Viagem, tratando-se de um anticlinal assimétrico em arco de circulo, com concavidade para SW, com uma orientação aproximada WNW-ESE. Estende-se para SE, pela Serra de Alhadas e de Maiorca, onde é interceptada pelo rio Mondego entre Sanfins de Cima (margem direita) e na margem esquerda, Senhora da Saúde (Serra de Verride). Implanta-se numa zona tectonizada, configurando uma intensa facturação aos calcários e a depósitos margosos associados (formações Jurássicas e Cretácicas). Associadas, encontram-se várias estruturas diapíricas não aflorantes, em Eireira e em Soure. A Serra calcária de Montemor-o-Velho situada na margem direita do Mondego, o planalto da Abrunheira, o planalto de Outil, correspondem entre outros, a

mais afloramentos desta unidade. Outras formas de relevo podem encontrar-se nestes maciços, estando associadas a processos tectónicos (ex. escarpas de falha no Maciço de Sicó), como depressões calco-margosas (do Rabaçal) resultantes essencialmente da erosão diferencial (Almeida *et al*, 1990). Quando a composição litológica e estrutural destes afloramentos é favorável aos processos de carsificação, várias formas de relevo cársico podem ser encontradas, tais como, dolinas, lapiás, grandes depressões, canhões, "reculées", algares e lapas.

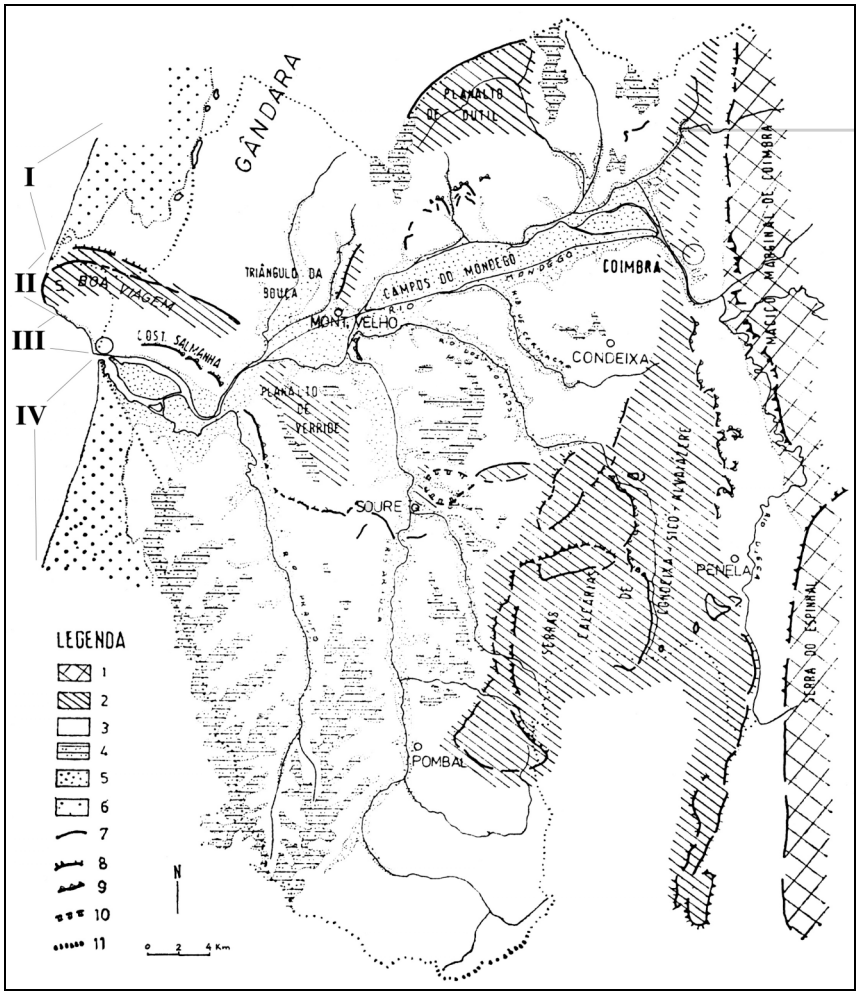


Figura 2. 5. Principais unidades morfo-estruturais com incidência na paisagem. Unidades fisiográficas litorais (I. sector a norte da Serra da Boa Viagem; II. Serra da Boa Viagem; III. sector entre a Serra da Boa Viagem e a foz do rio Mondego; IV. sector a sul da foz do Mondego); 1. Maciço Hespérico; 2. Serras e planaltos calcários; 3. Colinas gresosas; 4. Superfície Plio-Calabriana; 5. Planície aluvial; 6. Planície litoral; 7. Vertente escarpada de motivação litológico-estrutural; 8. Escarpa de falha; 9. Frente de costeira; 10. Diapiro de Soure; 1. Limite da bacia hidrográfica. Retirado de Almeida *et al* (1990).

As colinas gresosas, caracterizadas por um conjunto de colinas cuja cumeada normalmente não ultrapassa os 200 metros, desenvolvem-se em formações gresosas essencialmente pós-Jurássicas (figura 2. 5). São excepções as colinas geradas nos depósitos arenosos jurássicos das

Serras da Boa Viagem, Alhadas e no planalto de Verride e as modeladas nos Grés de Silves, junto ao Maciço Marginal de Coimbra. A morfologia destas colinas encontra-se frequentemente condicionada ao arranjo subestrutural das formações calcárias subjacentes, pela fracturação e por formações Plio-Quaternárias (Almeida *et al* 1990). Parte destas colinas desenvolvem-se em depósitos associados à transgressão do Pliocénico (Manuppella *et al,* 1978) e encontram-se associadas ao evoluir do Mondego, embora por vezes com um significado complexo, apresentam por vezes características aluvionares (ex. dos terraços fluviais de Ameal-Santo Varão e Tentugal-Gabrielos) (Soares *et al*, 1989).

Nas proximidades de Coimbra, o Mondego deixa os vales encaixados talhados nas formações geológicas do Maciço Hespérico, para se estender por uma vasta planície constituída por depósitos de aluviões, outrora inundados pelas cheias centenárias (figura 2. 5). A planície aluvial é caracterizada por grande heterogeneidade morfológica e formada por depósitos que «Apesar de recentes, estas formas têm uma história complexa que decorre das sucessivas acumulações estuarinas e fluviais impostas a partir do entalhe Würniano e da penetração do mar através do "profundo" vale então criado, nos finais do Würm, aquando do degelo e da subida do nível do mar aquando da transgressão Flandriana... » (Almeida *et al,* 1990). Estes depósitos apresentam uma grande heterogeneidade litológica e estrutural, bem como, uma grande espessura, estimando-se o seu volume em 3 a 4Mm^3. Almeida *et al* (1990) sugeriu que o rápido enchimento da bacia, em parte tenha sido justificada pelo regime hidrológico semitorrencial deste rio, como por uma grande disponibilidade de material detrítico mobilizável. Contudo, o seu regime hidrológico e a sua dinâmica sedimentar foi completamente alterada a partir da década de sessenta, com as obras de Aproveitamento Hidráulico do Rio Mondego (Baptista *el al,* 1995). A regularização de todo o seu traçado longitudinal e a impermeabilização do seu leito obstruíram a alimentação detrítica proveniente das formações sedimentares Meso-cenozoicas que lhe servem de substrato. Os depósitos aluviais antigos apresentam uma grande variedade litológica, motivada fundamentalmente

pela diferença da alimentação detrítica que os vários afluentes do Mondego drenavam para a bacia, podendo estes, ser caracterizados globalmente por materiais clásticos grosseiros, por vezes com calhaus de grandes dimensões e tradutores de regimes hidrodinâmicos mais vigorosos que os actuais (Almeida *et al,* 1990). Do ponto de vista morfológico, esta planície sofreu uma forte implantação agrícola, com explorações intensivas de várias culturas, sendo a principal o arroz. Identificam-se igualmente algumas áreas de polders, sapais e pauis (Rebelo *et al*, 1990).

A planície do Baixo Mondego corresponde a uma unidade paisagística de extrema complexidade, tanto nos aspectos físicos e biológicos, como humanos. A sua dimensão, produtividade potencial e localização, conferem-lhe enorme importância ecológica, sócio económica e política. Os pauis representam um ambiente ideal para algumas espécies de animais e plantas, defendendo as terras interiores da agressão da salinidade, funcionam como reguladores do clima, quer nas regiões mais junto ao litoral, quer no interior, de que são exemplo, o paul de Arzila, do Taipal, e da Madriz (Rebelo *et al*, 1990; Direcção Geral de Portos, 1990). O estuário do Mondego, corresponde a um outro ambiente muito importante no Baixo Mondego, representando uma transição entre o ambiente marinho e o fluvial. Corresponde a um ecossistema muito complexo de elevada diversidade biológica e múltiplos ambientes dinâmicos e sedimentares (Baptista *el al*, 1995).

A planície designada de litoral correspondeu a um termo geomorfológico definido para representar a orla costeira, de idade Quaternária, essencialmente arenosa, podendo ser caracterizada por praias que podem ou não apresentar dunas litorais, mais ou menos desenvolvidas, interrompida pela Serra da Boa Viagem e pela embocadura do estuário do Mondego, tendo sido subdividida em várias unidades fisiográficas, nomeadamente: no sector a norte da Serra da Boa Viagem (sector I da figura 2. 5), na faixa costeira correspondente à Serra da Boa Viagem (troço II), no sector compreendido entre a Serra da Boa Viagem e a foz do rio Mondego (o troço III), no sector a sul da foz do Mondo ou troço IV da orla costeira (Baptista *et al*, 1995).

CAPÍTULO 3. REVISÃO DA LITERATURA

Não pretendendo fazer uma síntese exaustiva de toda a literatura científica disponível relativa à hidrodinâmica e ao transporte sedimentar (de sedimentos desprovidos de propriedades coesivas) em estuários pouco profundos, seleccionaram-se as referências bibliográficas consideradas mais relevantes e as mais citadas em trabalhos da especialidade, bem como, as que também mais contribuíram para a realização deste trabalho. Foram também referenciados de uma forma muito resumida os trabalhos relativos ao tema, ou de áreas próximas do tema que está ser tratado apenas relativos ao estuário do Mondego.

3.1. Revisão Conceptual da Literatura

Classificação dos Estuários

Os estuários são sistemas costeiros muito complexos que apresentam uma grande variedade de formas, de processos físicos e uma a diversidade na sua génese, podendo a sua sistematização e classificação ser feita segundo diferentes perspectivas e aspectos que se consideram mais relevantes (Day *et al*, 1989). Segundo um ponto de vista hidrodinâmico os estuários podem ser definidos, como sistemas costeiros de interface entre o ambiente marinho e o continental, definidos por escoamentos naturais, ou seja, por massas de águas marinha, fluvial e/ou de águas salobras resultantes da mistura das primeiras (Dyer, 1997). Num ponto de vista hidráulico, pode ser definido por uma zona de transição entre o rio e mar, controlado essencialmente pela interacção entre as águas salinas da maré e pelos caudais de água doce de origem fluvial, produzindo um complicado sistema hidráulico com canais e planícies de inundação (Carter, 1989). Podem ser classificados considerando a sua geometria, características hidráulicas e estabilidade da sua embocadura (Jarrett, 1976). As suas barras podem ser classificadas em função da hidrologia, considerando o grau de mistura das águas doce e salgada, ou com base na sua morfologia, ou tipo de abertura. Segundo Galloway (1975 *in* Tonda, 1999) os estuários podem ser classificados com base nos principais agentes dinâmicos que controlam a sua morfologia, nomeadamente a ondulação marinha, a maré e

os caudais fluviais. A configuração da forma da embocadura pode ser usada como elemento de análise destes processos (Reynaud *et al*, 1999; Miranda *et al*, 2002). A distribuição da energia no estuário, a disposição geográfica de elementos morfológicos e de fácies sedimentares também podem ser usados como elementos de classificação (Dalrymple *et al*, 1992 *in* Dyer, 1997).

Onda de Maré

Os primeiros registos referentes ao estudo da propagação da maré em sistemas costeiros, remontam pelo menos aos Egípcios que tinham em consideração as variações verticais do nível da água na construção de cais para as suas embarcações. Contudo, foi só no século XIX que Newton ao descrever matematicamente as forças gravíticas geradas entre a Terra, a Lua e o Sol, lançou as bases científicas que descrevem a maré astronómica e que perduram até à actualidade. Desde então, um grande número de investigadores têm vindo a dar o seu contributo para o estudo da maré e seu comportamento quando se propaga em sistemas costeiros pouco profundos, citando apenas alguns dos trabalhos frequentemente considerados na literatura como os mais relevantes. Laplace introduziu as bases para a análise harmónica da maré enquanto Lord Kelvin desenvolveu o método da soma das componentes de maré, com a definição das respectivas frequências e amplitudes. Igualmente importante, consistiu a contribuição dos trabalhos de Bernoulli em 1738 com a "Teoria do Equilíbrio das Marés", caracterizando a deformação das massas de água. A maré corresponde a uma onda[1] que resulta da acção de forças de atracção gravitacional e que se propaga essencialmente ao longo de vastas áreas aquosas terrestres, nomeadamente nos oceanos e grandes lagos, podendo ser afectada pela profundidade, pela forma das bacias onde se desloca, bem como, pela rotação da terra que induz um efeito adicional - a força de Coriolis (Kowalik & Polyakov, 1998). A interacção destes factores também é responsável pelo desfasamento de alturas entre marés sucessivas[2]. Trata-se

[1]. Pode ser definida como uma oscilação de baixa amplitude e grande comprimento de onda que se forma no mar devido à atracção gravitacional luni-solar sobre grandes massas de água de superfície terrestres.
[2]. Também designado de diferença máxima diária da maré.

de uma onda longa, livre, caracterizada por um comprimento de onda[3] da ordem das várias centenas de quilómetros, com um período[4] aproximado a 12.42 horas para o caso da zona costeira adjacente ao rio Mondego (Sauvaget *et al*, 2000). Assim, esta maré semidiurna apresenta componentes de período quinzenal, mensal, anual, etc., que lhe conferem um comportamento periódico, do qual se podem diferenciar as marés mortas e as marés vivas associadas respectivamente às fases da lua de quadratura (quartos crescente e minguante) e de sízia (lua nova ou cheia), caracterizadas por amplitudes mínimas e mais elevadas. O comportamento sazonal abrange também as sízias de Outono e Primavera que atingem o valor máximo de amplitude e um valor mínimo no Inverno e no Verão. Períodos de 18.6 ou mais anos podem também ser considerados (Boer *et al*, 1989). Sobre a plataforma continental, a propagação da onda de maré apresenta um comportamento geralmente muito complexo, resultante da conjugação de vários tipos de ondas (ondas de Kelvin, de Poicaré, de carácter co-osxilatório, ondas estacionárias transversais, etc.) reguladas pela força centrípeta terrestre, e com as características fisiográficas (largura, topografia, …) da plataforma continental (Reynaud *et al*, 1999).

Para o estudo da propagação da onda de maré em sistemas costeiros pouco profundos, foram pioneiros os trabalhos desenvolvidos por Airy ao descrever matemática e fisicamente a propagação e deformação da maré como um fenómeno não linear, bem como, os trabalhos de Prasil & Dubs em 1909 e Lorentz em 1926, relacionando as variações longitudinais da amplitude da maré, com mecanismos de atrito gerados aquando da propagação da onda de maré e o fundo dos canais. Estes dois últimos autores também lançaram as bases para os primeiros estudos relativos ao transporte sedimentar que remontam só à década de quarenta, do século passado. A maré ao propagar-se em zonas costeiras pouco profundas para além das constituintes harmónicas de natureza astronómica passa a apresentar oscilações harmónicas de curto período geradas pela fisiografia (Beard *et al*,

[3]. O comprimento de onda da maré corresponde à distância compreendida entre duas preia-mares (cristas) ou duas baixa-mares (cavas) sucessivas.
[4]. O período da maré é definido pelo tempo decorrido entre duas preia-mares ou duas baixa-mares sucessivas no mesmo local.

1999). Atendendo a que as correntes de maré geradas nas zonas costeiras resultam da acumulação de águas devido à subida do nível do mar fundamentalmente em consequência da acção as forças gravíticas. Por exemplo Wells *et al* (1990) e Reynaud *et al* (1999) sugerem que a propagação da onda de maré nos estuários pode ser fundamentada nas diferenças de pressão hidrostática geradas nos diferentes sectores[5], muito embora outros aspectos possam condicionar e distorcer os movimentos desta, nomeadamente características fisiográficas, ocorrências meteorológicas locais, descargas fluviais entre outros adiante mencionados (Tonda, 1999). Esta relação biunívoca entre a distorção da maré e a morfologia do estuário é responsável por variações específicas ocorridas nas componentes vertical e horizontal da mesma, bem como nos processos de mistura. Nestes sistemas a distorção da maré também dá origem a dois tipos de correntes[6]: as correntes de enchente que se dirigem do mar para as zonas costeiras, provocando ali a acumulação de água e cujo máximo se denomina preia-mar, maré alta ou maré cheia. E as correntes de vazante que se deslocam em sentido contrário, escoando a água que se acumulou nas zonas costeiras durante a preia-mar, para o mar. O nível mais baixo atingido pela vazante é denominado de baixa-mar ou maré baixa, ou ainda, maré vazia, enquanto o período anterior à inversão das correntes de maré caracterizado por uma velocidade média nula[7] denomina-se de estofa de maré. A distância medida segundo a componente vertical compreendida entre a preia-mar e a baixa-mar define a altura da maré[8] (Carter, 1989). A maré que penetra no estuário para além do alcance da cunha salina ou maré salina, responsável pelo "empurrar" de águas fluviais para montante durante as fases de enchente é denominada de maré dinâmica. As correntes assim geradas neste sector superior do estuário são apelidadas de correntes dinâmicas (Godin, 1999).

[5]. Considerando os escoamentos homogéneos, e negligenciáveis as acelerações destes segundo a vertical (direcção z).
[6]. As correntes resultantes da acumulação de águas junto à costa devido à subida temporária do nível do mar consequência da atracção gravitacional.
[7]. ou praticamente nula ao longo da coluna de água.
[8]. A altura da maré é definida pela diferença dos níveis da preia-mar e da baixa-mar consecutivas, enquanto a amplitude da maré, corresponde à semidiferença dos níveis atingidos entre a preia-mar e a baixa-mar consecutivas, ou vice versa.

Processos Intervenientes na Propagação e Distorção da Onda de Maré

Em águas profundas, oceânicas, a onda de maré propaga-se com uma forma mais ou menos sinusoidal podendo ser considerada como desprovida de qualquer distorção. Em mar aberto apresenta um comprimento extremamente longo quando comparado com a sua altura[9], bem como, esta última apresenta um valor muito inferior às profundidades do oceano. Como a celeridade da onda de maré é directamente proporcional à profundidade e independente do seu período, a diferença entre a velocidade de propagação da preia-mar e da baixa-mar pode ser desprezável, apresentando uma amplitude e uma celeridade praticamente constantes ao longo de todo o ciclo da maré (Miranda *et al*, 2002). A onda ao aproximar-se de ambientes menos profundos da plataforma continental, começa a sofrer distorção quer ao nível da sua superfície livre, quer na sua celeridade, em consequência da sua interacção com a batimetria. Esta distorção torna-se ainda mais acentuada à medida que se propaga para zonas ainda menos profundas, nomeadamente, em estuários, lagunas, e em outros sistemas costeiros (Friedrichs & Aubrey, 1988; Tonda, 1999). Segundo van Rijn (1994) alguns dos principais fenómenos que podem interferir na propagação e consequente distorção da onda de maré nestes ambientes pouco profundos, podem ser englobados nos processos de reflexão, refracção, arrasamento, deformação e nos fenómenos de amortecimento. Os fenómenos de reflexão encontram-se associados a perdas de energia da onda de maré incidente quando esta se depara com obstáculos de fundo, de preferência dispostos perpendicularmente à direcção de propagação. Esta variação da profundidade faz com que parte da energia da onda incidente seja reflectida ou dissipada, fazendo com que a onda transmitida de menor energia, apresente um comprimento inferior e sofra um incremento na sua amplitude. Encontram-se associados a grandes barras submareais (Allen *et al*, 1991). Os fenómenos de refracção ocorrem quando a maré se aproxima de zonas pouco profundas e caracterizadas por uma diminuição gradual da coluna de água, orientadas segundo um determinado ângulo relativamente à direcção de propagação da onda, tal que, a parte

[9]. Por apresentarem um comprimento de onda muito superior à sua amplitude, este tipo de ondas são frequentemente denominadas de "ondas longas" (Dean & Dalrymple, 1991).

da crista da onda que se propaga nos sectores de menor profundidade apresenta uma velocidade inferior (com $u_w=h^{0.5}$) relativamente à parte que se propaga em águas mais profundas (com $u_w\approx(gh)^{0.5}$). Como resultado, nas zonas menos profundas a direcção de propagação da onda vai-se curvando de maneira a tornar-se quase paralela às isóbatas. Estes dois fenómenos apresentam uma expressão muito reduzida no interior de estuários regularizados segundo Speer & Aubrey (1985), Aubrey & Speer (1985) e Tonda (1999). Os fenómenos de arrasamento encontra-se associados à diminuição da velocidade de propagação da onda de maré quando esta se propaga em ambientes pouco profundos. De acordo com van Rijn (1994), ao admitir a energia total da onda definida pela expressão $E_w=0.125\rho g(A_w)^2L_w$ [10] se não se considerarem os mecanismos de reflexão e perdas de energia associadas, a altura da onda de maré nestes ambientes pouco profundos tenderá a aumentar, uma vez que $(A_w)^2L_w$ permanece constante e L_w diminui. Segundo o mesmo autor no interior destes estuários, o decréscimo suave da profundidade associado a uma diminuição mais acentuada da largura dos canais podem induzir na onda de maré uma distorção caracterizada por uma redução do seu comprimento de onda e um aumento da sua amplitude, sinónimo da propagação hipso-síncrona definida por Le Floch, 1961 *in* Borrego *et al* (1995). Os fenómenos de deformação da onda de maré tendem a ocorrer quando esta se propaga num sistema pouco profundo, provocando uma distorção na sua forma proporcional à variação da altura da coluna de água durante o ciclo de maré. Uma vez que a celeridade da onda é proporcional a $h^{0.5}$, a crista da onda de maré tende a propagar-se com uma celeridade superior que aquando da propagação na sua cava. O facto de a celeridade da preia-mar ser superior à da baixa-mar, faz com que a preia-mar se adiante, enquanto a baixa-mar se atrase, gerando em fases de maré consecutivas períodos distintos. Assim, a distorção da maré num estuário pode ser caracterizada por uma assimetria nas velocidades da corrente, definida por um intervalo mais curto, mas de maior intensidade num dos sentidos (enchente ou vazante) e um intervalo mais longo mas de menor intensidade, no sentido oposto da maré (Wenning, 2000). A

[10]. Energia total da onda de maré por unidade de largura (van Rijn, 1994).

forma das secções molhadas num estuário, também pode condicionar a celeridade da onda de maré, que no caso das secções transversais regularizadas do tipo trapezoidal no estuário do Mondego, tende a incrementar a celeridade durante a preia-mar e diminui-la durante a baixa-mar, distorcendo também a onda de maré ao reduzir o intervalo de tempo entre as estofas da BM e da PM. Em termos gerais, este fenómeno pode ser traduzido numa diminuição no período de enchente e num aumento da intensidade da sua velocidade, e consequentemente numa maior capacidade de transportar sedimentos em regime de tracção para o interior do estuário (Shetye & Gouveia, 2002; Mantovanelli *et al*, 2004). A deformação da onda de maré no interior de estuários pouco profundos, pode ser descrita matematicamente com recurso a componentes adicionais às de natureza astronómica, denominando-as de componentes harmónicas não lineares[11]. Os fenómenos de amortecimento da onda de maré encontram-se relacionados com as perdas de energia associadas às forças de atrito geradas entre os fundos dos canais e os escoamentos estuarinos. Como a energia da onda é proporcional a $(A_w)^2 L_w$, as forças de atrito geradas pelo fundo tendem a reduzir exponencialmente a altura da onda aquando da sua propagação em ambientes com batimetrias constantes, mas pouco profundos (Borrego *et al*, 1995). A acção do atrito de fundo na distorção da onda de maré aumenta de uma forma não linear para as zonas menos profundas do estuário, introduzindo um conjunto de componentes harmónicas não lineares com frequências superiores às da onda sinusoidal original (Foreman & Henry, 1989). Esta componente da distorção é directamente proporcional ao incremento da velocidade, sendo também responsável pelo aumento do abrandamento dos escoamentos nas zonas menos profundas, bem como, durante as BM. A conjugação destes aspectos faz com que o atraso ocorrido entre a BM na embocadura e na cabeça do estuário seja superior ao verificado aquando da PM (Speer *et al*, 1991). Autores como Carter (1989) e Woong & McDonald (2004) consideram que os fenómenos de refracção e reflexão normalmente apresentam uma grande importância relativa na distorção da onda de maré em

[11]. Estas também se podem designar de componentes de ambientes pouco profundos, ou ainda de componentes secundárias (que englobam as sobremarés e as componentes de marés compostas).

ambientes de plataforma continental, tornando-se praticamente insignificantes nos estuários de reduzidas dimensões. Fry & Aubrey (1990), Speer *et al* (1991) e Blanton *et al* (2000) consideram que nos estuários pouco profundos (semelhantes ao Mondego), a distorção da onda de maré astronómica é fundamentalmente gerada pelos fenómenos de amortecimento resultante das forças de atrito geradas pelo fundo dos canais, pela deformação formada pelas diferenças na velocidade de propagação da onda e pelos processos de arrasamento resultantes da diminuição da profundidade e/ou da redução das secções transversais dos canais. A presença de grandes barras torna-se responsável pela reflexão da onda de maré (Dronkers, 1986). Friedrichs & Aubrey (1988) consideram que para além do atrito de fundo a da geometria, a assimetria da maré pode estar condicionada pelo comprimento e pela amplitude de maré no estuário, realçando também, a importância que o estudo da propagação dos ciclos mareais apresenta para a análise da cobertura sedimentar. De acordo com Speer *et al* (1991) os anterior fenómenos muito relacionados com a fisiografia de um estuário pouco profundo, não definem na íntegra este complexo fenómeno da propagação e distorção da maré, mencionando outros, nomeadamente a acção de correntes estuarinas não controladas pela maré oceânica (caudais fluviais e a agitação marítima), o transporte sedimentar em suspensão, bem como, a periodicidade da maré. Contudo, as contribuições na distorção dos escoamentos por parte de ocorrências meteorológicas locais (acção do vento, da chuva, sobreelevação do nível da água), a acção da agitação marítima que se faz sentir no sector distal do estuário do Mondego, não foram quantificadas no âmbito deste trabalho, muito embora tenham sido objecto de estudo noutros sistema costeiros portugueses adjacentes, por Cristina *et al* (1994), Dias *et al* (1996), e Dias *et al* (2000). A distorção de natureza fluvial pode representar uma componente considerável na distorção total da onda de maré de um estuário, aquando de regimes fluviais moderados a elevados e descrever quadros dinâmicos bem misturados, parcialmente misturados e de cunha salina (Kjerjve, 1987 e Fairbridge *in* Miranda *et al*, 2002). Este tipo de assimetria favorece a drenagem dos escoamentos para fora do sistema, com o prolongamento da

vazante, e o incremento das velocidades de vazante em detrimento das de enchente. Tentando descrever os processos de circulação e mistura nos vários tipos de quadros de mistura em função da competição ocorrida entre a maré e as descargas fluviais (Stacey *et al*, 1999; Chant & Wilson, 2000; Chapalain & Thais, 2000). Descrevem-se ajustes na circulação e nos processos de mistura estuarina em função da magnitude das descargas fluviais e identificam-se os efeitos causados na maré, nomeadamente com o incremento do nível médio da variação da superfície livre, com o efeito obstrutivo à entrada e propagação da maré para montante durante a enchente e consequente redução da celeridade (Vongvisessomjai & Rojanakamthorn, 1989; MacCready, 1999).

Modelos Numéricos e a Análise Harmónica

O fenómeno de propagação não linear da onda de maré num estuário pode ser estudado, quer recorrendo à elaboração de modelos matemáticos mais ou menos complexos, quer recorrendo à análise harmónica quando se dispõe de séries de dados maregráficos locais, permitindo desta forma a decomposição das diferentes constituintes de natureza astronómica e/ou não lineares da maré (Carter, 1989). Os primeiros modelos, também designados de numéricos, baseiam-se fundamentalmente na resolução analítica das equações do movimento integradas no espaço e no tempo, cuja complexa resolução, se traduz num conjunto de aproximações de distintas ordens, cuja combinação permite avaliar a distorção da maré e as respectivas assimetrias da superfície livre e das velocidades associadas. A solução de primeira ordem é definida pela resolução linear das equações e representa a propagação sinusoidal da onda de maré (ou seja, das componentes astronómicas), tendo em consideração a secção média do estuário e a dissipação de energia resultante dos fenómenos de atrito do fundo e pela geometria das margens. A solução de segunda ordem define a resolução não linear das referidas equações e representa a propagação das componentes associadas aos ambientes pouco profundos. A solução numérica deste tipo de equações[12] que descrevem a propagação da onda de maré, requerem a definição da batimetria do estuário, muito embora não

[12]. Que correspondem a derivadas das equações diferenciais do movimento para condições particulares.

seja possível generalizar a influência da morfologia na resposta hidrodinâmica deste sistema, nem mesmo avaliar quantitativamente o fenómeno da propagação da maré. Outra desvantagem deste método, relaciona-se com as soluções analíticas das equações do movimento, ao fundamentar-se na linearização das referidas equações, bem como, na pressuposição de um conjunto de simplificações de parâmetros geométricos, características dos escoamentos e de condições de fronteira do estuário, muito embora a calibração destes modelos com dados de campo seja recomendada (Tonda, 1999). Tendo sido este último método foi o adoptado para o estudo da propagação da maré no estuário do Mondego. Considerou-se que a maré oceânica pode ser representada pela soma de um conjunto finito de constituintes sinusoidais gravíticas com frequências conhecidas e com períodos distintos, que no estuário do Mondego foram definidas por Baptista *et al* (1990) e Baptista *et al* (1995). Segundo Foreman & Henry (1989), a distorção da maré associada à propagação em sistemas costeiros pouco profundos, caracteriza-se por uma dissipação de energia, quer resultante da acção das tensões de atrito geradas principalmente pelo fundo, quer por perdas de energia não lineares das suas principais componentes assim geradas. As forças de atrito formadas pela acção do fundo, reduzem a amplitude da maré e criam atrasos nas suas fases, enquanto as transferências de energia não lineares produzem componentes de maré secundárias, com amplitudes e fases distintas. A dissipação de energia associada à formação destes harmónicos, pode produzir assimetrias, quer na variação vertical do nível da água, quer nas velocidades das correntes da maré, repercutindo-se na resultante do transporte sedimentar (Friedrichs & Aubrey, 1988). Assim, a maré incidente num sistema estuarino pode ser decomposta num conjunto de constituintes harmónicas de natureza gravítica (M_2, S_2, N_2, K_1, O_1, etc.) e por outras constituintes não lineares (secundárias) que se formam aquando da distorção da maré em sistemas costeiros pouco profundos, que resultam da distorção da onda de maré e podem subdividir-se em sobremarés[13] e em marés compostas. As sobremarés correspondem às constituintes harmónicas não lineares que se geram a partir das

[13]. Ou também designadas de super-harmónicos, apresentam frequências múltiplas da respectiva constituinte principal.

constituintes principais, com uma frequência múltipla das gravíticas que as originou. Isto significa, que a partir da componente semidiurna lunar geralmente mais importante geram-se as sobremarés M_4, M_6, M_8, etc. enquanto para a componente solar S_2, formam-se as sobremarés S_4, S_6, S_8, etc. (Blanton *et al*, 2002). As constituintes de marés compostas resultam da interacção entre componentes principais gravíticas, e as suas frequências correspondem à soma ou à subtracção das frequências das componentes que as originaram (Dyer, 1979). O número de constituintes harmónicas compostas que se geram nestes sistemas é muito superior ao do número das sobremarés, dada a interacção entre as diferentes constituintes harmónicas principais. De entre as constituintes mais estudadas nestes sistemas costeiros pouco profundos destacam-se a MS_4 e a MSf resultantes respectivamente da adição e da subtracção das constituintes gravíticas semidiurnas lunar M_2 e a solar S_2 (Dronkers, 1986).

O estudo da propagação não linear da maré num estuário pouco profundo, segundo um ponto de vista teórico, apresentará vantagens num maior número de constituintes harmónicas, gravíticas e não lineares estudadas, pois mais completo será. Contudo, também mais complexa se torna a sua interpretação dado o elevado número de componentes que se geram nestes sistemas pouco profundos, tornando-se mesmo, quase impossível a análise conjunta das constituintes compostas e das sobremarés, assim como, o estudo da análise da tendência evolutiva do estuário, onde a sua fisiografia e o atrito de fundo têm uma importância muito relevante (Speer & Aubrey, 1985; Foreman & Henry, 1989). Na prática, recorre-se ao estudo de algumas das constituintes, fundamentalmente as mais significativas, para se obter uma relação entre a fisiografia do estuário e a respectiva hidrodinâmica (Blanton & Andrade, 2001; Blanton *et al*, 2002). Estes autores consideram também que a distorção que a onda de maré sofre ao propagar-se num estuário pouco profundo, pode ser descrita recorrendo apenas à análise da constituinte harmónica gravitacional principal da maré[14] e das sobremarés associadas, permitindo assim para além da sua quantificação,

[14]. Constituinte astronómica de maiores amplitude e frequência incidente, por exemplo M_2 ou S_2.

descrever também a tendência evolutiva do estuário, ou seja, definir se apresenta um domínio da enchente ou da fase da vazante. Para tal, recorre-se a um sistema de equações definidas pela adição das várias constituintes harmónicas, nomeadamente a constituinte gravítica principal e sobremarés relacionadas, caracterizadas por determinadas amplitudes e fases, permitem em conjunto, definir as propriedades da assimetria da onda de maré, quer para a variação da superfície livre, quer para as velocidades, usadas neste trabalho. As magnitudes das amplitudes e as fases destas constituintes podem ser calculadas, quer recorrendo a modelos numéricos, quer recorrendo a dados maregráficos observados nos diferentes sectores do estuário (van Rijn, 1994). A maré ao propagar-se num estuário pouco profundo começa a distorcer, evidenciando assimetrias nas suas fases, quer no que diz respeito à variação da superfície livre, quer da velocidade. A variação não linear da área e do balanço volumétrico da água que decorrem neste sistema, quando conciliados com o atrito de fundo, representam os mecanismos mais importantes na distorção da onda de maré, que de acordo com Dyer (1997) são responsáveis pela formação das sobremarés e das componentes compostas. Relacionam este fenómeno com as diferenças ocorridas na celeridade dos escoamentos em diferentes fases da maré, resultantes do decréscimo da profundidade, da sua propagação em zonas pouco profundas, da variação da largura dos canais, bem como, com as diferenças de profundidades ocorridas entre a preia-mar e a baixa-mar, que por sua vez se repercutem nas forças geradas entre o fundo dos canais e os escoamentos do estuário (Dronkers, 1986). Desta forma, alguns autores relacionam a distorção da maré no estuário com a competição ocorrida entre o atrito de fundo com as variações da largura e profundidade dos canais (Borrego *et al*, 1995; Beard *et al*, 1999), ou com as mudanças de forma e com a capacidade de armazenamento de água durante as preia-mares nos ambientes intermareais, de que são exemplo, parâmetros que relacionam áreas dos ambientes do canal e dos ambientes intermareais de uma secção transversal, ou também os respectivos volumes (Speer & Aubrey, 1985; Aubrey, 1988; Speer *et al,* 1991). Nos sistemas estuarinos em que M_2 corresponde à principal constituinte astronómica, a sobremaré de maior importância a ser formada

quando a onda de maré se propaga no interior de um estuário pouco profundo e caracterizado por baixos regimes fluviais[15] corresponde a M_4. Segundo Dyer (1997) a maior parte da distorção da curva da maré resultante do atrito de fundo e/ou da fisiografia pode ser representada pela sobreposição destas duas constituintes quer para a componente vertical, quer para a horizontal da maré. Neste contexto hidrodinâmico, a variação da superfície livre e da velocidade podem ser descritas matematicamente no interior do estuário recorrendo a um sistema de equações constituídas pela adição de várias constituintes harmónicas, designadamente a constituinte gravítica principal que estima a frequência da onda original e pelos seus super-harmónicos, cujas frequências são múltiplas da frequência principal.

Quantificação da Distorção da Maré e Tendência Evolutiva do Estuário

A análise do aumento da amplitude M_4 ao longo do estuário traduzida na variação da relação M_4/M_2, permite avaliar o grau de distorção sofrido pela maré, bem como, a relação ocorrida entre as fases definida pela expressão $2M_2$-M_4 possibilita definir o tipo da assimetria sofrida por esta onda (Aubrey & Speer, 1984; Friedrichs & Aubrey, 1988; Dyer, 1997). Assim, para as velocidades médias da onda de maré, a expressão $2\left(u_{M_2}\right) - u_{M_4}$ define a relação ocorrida entre as fases destas constituintes harmónicas principais, enquanto a equação V_{M4}/V_{M2} traduz a relação entre as amplitudes. Relacionaram também os ambientes estuarinos de domínio de vazante com canais mais profundos e com extensas áreas intermareais, com sapais, que conferem uma elevada capacidade de retenção de água intermareal durante as preia-mares (Healey *et al*, 1981; Wang *et al*, 1999a; Wang *et al*, 1999b).

Mistura e Estratificação

Realçam-se os trabalhos pioneiros de Stommel (1953) e mais tarde os de Prichard (1955) e de Cameron & Prichard (1963) com a identificação dos estuários de cunha salina, bem como, com o início do estudo do balanço salino, e a circulação de ondas estacionárias (com a definição de vários

[15]. regime de baixa estratificação e bem misturado.

graus de estratificação e mistura). O trabalho de Pritchard (1952) relativo à dinâmica, estratificação da densidade e aos processos de mistura no estuário de Chesapeake também merece realce por os relacionar fundamentalmente com a fisiografia do estuário (morfologia, batimetria, comprimento, largura, etc.), com a maré, com a dinâmica da zona costeira adjacente, com a salinidade, com os caudais de água doce, e com o vento que actua directa ou indirectamente sobre a sua superfície livre.

A maré salina ao propagar-se num estuário tende a ser neutralizada com a mistura vertical e longitudinal resultante dos movimentos turbulentos dos escoamentos que ocorre nas zonas de interface (Pritchard, 1952; Schroeder *et al*, 1990). Por exemplo, de acordo com Lu *et al* (2000) a intensidade desta mistura que ocorre no estuário para além do tipo de regime hidráulico dos escoamentos, também depende da estabilidade vertical ocorrida na interface das camadas em movimento de densidade distinta, estando a intensidade da turbulência a controlar a distribuição vertical das propriedades físicas na coluna de água. Pelo que considera que a competição acontecida entre a estratificação vertical e a intensidade de mistura poder condicionar fortemente toda a dinâmica estuarina. Englobam-se os principais processos intervenientes na mistura em estuários pouco profundos, nos advectivos e nos processo difusivos, à semelhança do considerado por Sinha *et al* (1999), Peters & Bokhorst (2000). Os primeiros processos contribuem para a mistura a uma escala macroscópica, que englobam os movimentos originados pela maré, pelos caudais fluviais, os fenómenos de arrastamento e os movimentos resultantes dos gradientes de densidade anteriormente referenciados. Por processo difusivos, os relacionados com os movimentos de mistura que têm lugar a nível microscópico e que são fundamentalmente representados pela difusão molecular e pela difusão turbulenta. Este último corresponde a um processo muito lento e pouco expressivo nestes sistemas costeiros pouco profundos e com uma dinâmica fortemente regulada pela maré (Peters, 1995; Stacey *et al*, 1999; Peters & Bokhorst, 2000; Peters & Bokhorst, 2001). Segundo os referidos autores, a mistura turbulenta corresponde a um mecanismo de mistura associado à turbulência

interna[16] e aos fenómenos de cizalhamento gerados no fundo, desempenhando um papel primordial na mistura vertical e longitudinal[17] de massas de água com características físicas muito diferentes (entre as marinhas e as fluviais), no sentido de as aproximar, gerando águas de mistura ou salobras. Acresce a estes dois mecanismos a turbulência criada à superfície dos escoamentos pelo atrito do vento, são responsáveis pela formação de ondas de gravidade e de correntes de superfície (Bowden, 1978; Dias *et al*, 1996; Dias *et al*, 1998). Relativamente aos restantes processos de mistura, a generalidade dos autores definem ter uma importância relativa superior em estuários pouco profundos com regimes dinâmicos dominados pela maré, sendo a sua intensidade directamente proporcional à altura desta. As ondas internas também desempenham um papel muito importante nos processos de mistura, uma vez serem geradas por massas de água distintas que se movem umas sobre as outras com sentidos de propagação diferentes, ou segundo o mesmo sentido mas com velocidades diferentes, gerando movimentos cizalhantes na zona de interface, criando instabilidade local sob a forma de pequenos turbilhões ou de ondas, que por sua vez são responsáveis por uma forte mistura turbulenta entre elas na zona de interface. Este fenómeno de arrastamento corresponde a um processo unidireccional interno, de mistura adicional à advecção e à difusão turbulenta, sendo também responsável pelo efeito baroclínico que gera movimentos estuário acima. A sua importância relativa de entre os restantes processos de mistura, torna-se superior em sistemas dominados pelos regimes fluviais, aumentando proporcionalmente com o aumento da intensidade das descargas fluviais (Peters, 1995; Howarth, 1998; Peters, 1999; Chant & Wilson, 2000). Os caudais fluviais apresentam um efeito baroclínico no gradiente de pressão que tende a gerar movimento de massa estuário acima e a fomentar a estratificação salina, enquanto os fluxos mareais com o atrito de fundo tendem a produzir turbulência e consequentemente fomentar a mistura. O balanço ocorrido entre estes dois processos traduz uma razão de magnitude estratificação/mistura

[16]. Que se origina no interior dos escoamentos pelas flutuações turbulentas da velocidade e que condiciona o gradiente vertical de densidade (ou salinidade).

[17]. Com a mistura horizontal turbulenta a ter tido um papel mais relevante no caso do Mondego, face ao elevado quociente registado entre extensão/profundidade do estuário e também por a estratificação da densidade inibir a mistura vertical, à semelhança do considerado para outros sistemas semelhantes por Dyer (1986).

que permite quantificar e classificar os estuários, muito embora eventuais movimentos residuais criados por gradientes de densidade o possam distorcer e tornar difícil a contabilização da variabilidade geográfica e temporal destes efeitos no estuário (Godin, 1985; Vongvisessomjai & Rojanakamthorrn, 1989; Godin, 1999). A razão de fluxo ou relação de fluxo (R/P) correspondeu a um dos primeiros parâmetros adimensionais a ser usado para quantificar a competição ocorrida entre os regimes fluviais e a maré, tendo sido inicialmente proposto por Simmons, 1955 *in* Dyer (1997). Com base em resultados experimentais permitiu definir diferentes tipos de estratificação vertical nos estuários considerando a importância relativa dos principais agentes dinâmicos indutores de água fresca continental e salina (Miranda *et al*, 2002). É igualmente exemplo o número de estratificação introduzido por Prandle (1985, *in* Miranda *et al*, 2002).

Para além da estrutura da salinidade, os diagramas de classificação têm em linha de conta os principais processos intervenientes na mistura vertical dos estuários, designadamente a dissipação de energia, o ganho de energia potencial na coluna de água, características estacionárias da velocidade de superfície, da velocidade dos caudais fluviais, e da circulação gravitacional (Dyer, 1997). Fundamentam-se na sua maior parte das vezes em resultados experimentais de sistemas naturais e/ou de laboratório, ou também em modelos teóricos abrangentes de diversificadas condições de estratificação, de circulação, de regimes de maré e de caudais fluviais. Um dos diagramas mais utilizados relaciona o número de estratificação (S_t) com o parâmetro de estratificação (n_S) e foi desenvolvido por Prandle (1990). Um outro, corresponde ao diagrama de Estratificação-circulação inicialmente proposto por Hansen & Rattray (1966) *in* Miranda *et al*, 2002), tendo vindo a constituir um dos mais completos e utilizados na classificação dos estuários (Fisher, 1972; Dyer, 1997, etc.) e a ser alvo de introdução de vários parâmetros complementares (Prandle, 1985; Pritchard, 1991; Scott, 1993). A versão base fundamenta-se num modelo bidimensional estacionário de geometria simples, e relaciona o parâmetro de estratificação com o parâmetro de circulação (u_s/u_r), permitindo desta forma avaliar a parcela relacionada com o fluxo

salino no estuário inerente aos processos de difusão turbulenta mareais, com os processos advectivos (circulação gravitacional). Por desvantagens, apresenta a dificuldade em determinar a variação geográfica e temporal desta relação no estuário, bem como, de considerar amplitudes finitas da maré. A aplicação deste modelo requer que se verifique uma homogeneidade lateral das propriedades físicas vigentes em estuários estreitos e sob condições estacionárias.

Transporte Sedimentar

Os trabalhos mais recentes relativos ao transporte sedimentar, têm sido orientados fundamentalmente na aplicação a estudos e projectos de portos e à regularização de estuários, consistindo na elaboração de modelos mais ou menos sofisticados, fundamentados na resolução analítica ou numérica das equações do movimento, e recorrendo frequentemente a calibrações de vários parâmetros, com ou sem acesso a informação de campo (Nihoul & Jamart, 1987; Chapalain & Thais, 2000; Paphitis *et al*, 2001; Davies *et al*, 2002; Lobo *et al*, 2004).

O transporte sedimentar resultante da acção de escoamentos em canais estuarinos de fundo móvel, desprovidos de propriedades coesivas, é caracterizado por uma grande complexidade, dados os múltiplos e intrincados factores que controlam este processo (Dyer, 1979; Chanson, 2004). Destes, podem-se citar as interacções entre o escoamento líquido e o transporte sólido, a difícil definição das modalidades de transporte em regime de tracção e/ou suspensão, as formas adquiridas pelo fundo resultantes do hidrodinamismo do próprio escoamento, e das características do sedimento (Yalin, 1977; Wiberg & Smith, 1987). Segundo estes autores, os processos relacionados com o transporte sedimentar regulado por correntes, ocorrem principalmente na zona perto do fundo, tornando-se da maior importância para o seu estudo, conhecer as condições do escoamento perto do sedimento, tais como, as tensões de corte, a natureza do fundo, e a presença ou ausência de estruturas sedimentares, etc. Desta forma, os sedimentos podem entrar em movimento se as forças hidrodinâmicas resultantes do escoamento e exercidas sobre as partículas, forem capazes de as deslocar (Allen, 1992; Soulsby, 1997). Parte destas partículas sedimentares podem mover-se

segundo trajectórias mais ou menos concordantes com as trajectórias das velocidades do fluxo, mas em número e com uma distribuição espacial com uma grande componente aleatória (Middleton & Southard, 1984). A modalidade de transporte correspondente às partículas que rolam ou escorregam sobre o substrato detrítico, denomina-se transporte sedimentar por tracção ou arrastamento. No transporte constituído por partículas que apresentam movimentos com trajectórias de saltos intercalados com pequenos períodos que rolam e/ou escorregam sobre o fundo, denomina-se transporte por saltação. Por fim, aos grãos do sedimento que são transportados no seio do fluido em movimento, são transportados sob um regime de suspensão. Contudo, na maior parte dos estudos não é possível diferenciar o transporte das partículas por saltação das outras modalidades (Allen, 1997). Tal facto, e numa perspectiva numérica, leva a considerar o transporte sedimentar total de um canal, como caracterizado por um transporte de fundo e pelo transporte das partículas em suspensão. Considera-se o transporte de fundo ou de carga de fundo, abrangente das partículas que se movimentam sob a forma de tracção e saltação, quase permanentemente em contacto com o fundo. As partículas movem-se com uma velocidade variável, cujo valor médio é muito inferior à do escoamento (Bagnold, 1968; Raudkivi, 1990; Fredsøe & Deigaard, 1992; van Rijn, 1993; Soulsby, 1997). Este modo de transporte é característico das partículas arenosas ou mais grosseiras e corresponde a fracções de material cuja granulometria se encontra presente no sedimento de fundo (Douglas, 1946; Friedman & Sanders, 1978).

Quando as forças do escoamento que actuam sobre o fundo (forças de arrasto e de levantamento), ultrapassam a força hidráulica crítica responsável pelo limiar do movimento das partículas presentes no fundo, inicia-se o transporte sedimentar (Miller *et al*, 1977; Yalin, 1977; Middleton & Southard, 1984; Green, 1999). Contudo, torna-se muito difícil definir esta força critica, principalmente quando os sedimentos não são equidimensionais e quando os escoamentos apresentam características muito turbulentas (Hammond *et al*, 1984; Fredsøe & Deigaard, 1992; Soulsby, 1997). Com o aumento da velocidade da corrente de um escoamento e consequentemente

da velocidade de corte de fundo, as partículas sedimentares deixam de se movimentar em tracção junto ao fundo, para se deslocarem sob a forma de saltos mais ou menos regulares no fluxo. Quando a velocidade de corte do fluxo junto ao fundo apresentar um valor aproximado ao da velocidade de sedimentação destas partículas em movimento de saltação, elas passam a ser transportadas em suspensão no sentido do escoamento (Yalin, 1977; van Rijn, 1989; Dyer & Manning, 1999). Por exemplo Bagnold (1968), sugeriu que as partículas em movimento entram em transporte de suspensão quando a componente da velocidade da corrente segundo a vertical do regime turbulento for igual ou superior à velocidade de sedimentação das partículas sedimentares. O fundo detrítico comporta-se como um obstáculo físico à propagação de um escoamento (van Rijn, 1984; Wiberg & Smith, 1987). Motivos pelos quais, se optou por estudar apenas a componente de tracção do transporte sedimentar no estuário do Mondego.

Dependendo de vários factores, a superfície do fundo de natureza sedimentar com propriedades não coesivas, origina gradientes de pressão e uma resistência ao movimento do fluido, gerando uma camada limite interna que pode atingir uma espessura de alguns metros acima da superfície do fundo do canal (Falconer, 1985; Chanson, 2004). À resistência gerada à propagação do escoamento, denomina-se de rugosidade do fundo ou rugosidade hidráulica ou ainda, pode ser denominada de rugosidade de Nikuradse, por este autor ter definido este conceito (Raudkivi, 1990; Fredsøe & Deigaard, 1992). Quando o substrato sedimentar não é plano, há que adicionar à resistência originada pela superfície dos grãos, a resistência resultante das formas de fundo e a resultante do movimento dos sedimentos, quando este ocorre (Yalin, 1985; Wiberg & Smith, 1987 Green *et al,* 1995; Nielsen, 1994). No transporte em suspensão, as partículas são transportadas no seio da água, sendo mantidas na coluna de água essencialmente pela turbulência e pela velocidade do agente transportador. A velocidade destas partículas não varia muito e o seu valor médio é muito próximo do da velocidade média do escoamento (Officer, 1981; O`Connor & Nicholson, 1988; Rolinski & Eichweber, 2000). Quando a velocidade da corrente diminui, reduz igualmente a sua

capacidade de transporte e consequentemente muitas das partículas começam a precipitar-se para o fundo (Komar & Carling, 1991). Contudo, algumas partículas mantém-se em suspensão num fluido mesmo estando em repouso. As partículas transportadas em regime de suspensão correspondem maioritariamente a partículas de diâmetros mais pequenos, nomeadamente areias finas, siltes e argilas (Douglas, 1946; Green *et al,* 1995; Rajkumar & Chang, 2000). À medida que a velocidade do escoamento aumenta, algumas das partículas em repouso sobre a superfície do substrato, iniciam o movimento, rolando sobre o fundo, outras escorregam por cima de outras paradas de maior diâmetro ou densidade. Com o incremento da velocidade da corrente algumas das partículas dão pequenos saltos, alternados com períodos de rolamento sobre o fundo ou até mesmo com paragens, outras menos densas ou mais pequenas, passam a deslocar-se no seio do escoamento em suspensão pela acção da turbulência, embora esporadicamente possam tocar no fundo (Komar & Miller, 1975; Allen, 1997).

Autores como Speer *et al*, 1991; van Rijn (1994); Gao & Collins (1997) consideraram que a assimetria favorável às correntes de enchente corresponde ao mecanismo básico para a intrusão salina no interior dos estuários, ponderando mesmo que será maior em sistemas caracterizados por uma elevada estratificação. Assim, nos sectores sujeitos à maré salina, junto ao fundo a velocidade média residual da maré será favorável à enchente e consequentemente indiciadora de um maior transporte sedimentar de fundo para o interior do estuário, enquanto à superfície este fenómeno é inverso, com o escoamento residual a fazer-se em direcção ao mar. O conhecimento da assimetria da maré torna-se da maior relevância para o estudo e a quantificação do transporte de materiais sólidos num estuário, (Dyer, 1997). Muitos têm sido os modelos propostos para estimar o transporte sedimentar, sendo eles fundamentados em modelos teóricos e em trabalhos experimentais de campo e laboratório (Yalin, 1977; Dyer, 1986; Raudkivi, 1990; van Rijn, 1993; Soulsby, 1997).

Vários foram os estudos relativos à hidrodinâmica e ao transporte sedimentar no estuário do Mondego, publicados pelo autor deste trabalho em co-autoria, que não integram ou constituem

qualquer capítulo ou subcapítulo desta Tese de Doutoramento, pelo que são usados e citadas partes dos mesmos, designadamente:

- Trabalhos desenvolvidos por Duarte & Reis (1992) relacionaram tendências de avanço e recuo da linha de costa adjacente à foz do Mondego com a construção das obras de regularização e estruturas de protecção do litoral, quantificando as respectivas taxas.

- Reis & Duarte (1990) identificaram um défice de material detrítico de origem fluvial grosseiro no estuário e associam-no ao represamento a montante das barragens e açudes do Mondego, que foi compensado com a entrada de sedimentos de proveniência marinha para o sector distal do estuário. O défice de material silto-argiloso no braço norte relacionou-o com a destruição antrópica dos ambientes intermareais naturais e das zonas de sapal e com a maior penetração da maré para o interior do estuário.

- Duarte (1989), Duarte & Reis (1991a) e Duarte & Reis (1991b) tendo por base as características granulométricas, mineralógicas e texturais dos sedimentos da cobertura do fundo do estuário, identificaram uma grande semelhança entre as areias marinhas em deriva longilitoral com os sedimentos dos sectores médio-distais dos braços norte e sul, e semelhanças com os sedimentos fluviais para as areias do sector proximal do braço norte. Parte do sector médio e proximal foi caracterizado por sedimentos com características petrográficas peculiares. Relacionaram a distribuição espacial e temporal deste sedimentos com a hidrodinâmica estuarina.

- Duarte *et al* (1991) apresentou um estudo preliminar sobre a distribuição e proveniência dos minerais de argila transportados em suspensão no estuário. Constatou que o material em circulação no estuário provém fundamentalmente do transporte fluvial, identificando mesmo diferentes fontes de material argiloso. O Mondego transporta fundamentalmente a ilite, enquanto o Pranto a esmectite, os inters-estratificados ilite-esmectite e a caulinite.

- Duarte & Reis (1993), Duarte (1994) fazem uma caracterização hidrodinâmica do estuário com base em perfis longitudinais e transversais aos dois canais do estuário, de vários parâmetros

físicos e sedimentológicos, assinalando comportamentos distintos entre ambos, quanto à mistura e circulação. No canal principal foram identificados três domínios hidrodinâmicos (marinho, fluvial e d mistura) e relacionou os movimentos longitudinais dos seus limites com as magnitudes dos agentes hidrodinâmicos, relacionando-os com um regime do tipo parcialmente misturado. No braço sul identificou-se uma mistura e estratificação do tipo bem misturada.

- Duarte & Reis (1994) identificaram vários impactes na hidrodinâmica e na circulação estuarina, resultantes da regularização do braço norte, entre a Zona Estuarina de Transição entre o Porto da Figueira de Foz e o Troço Terminal de Regularização do Baixo Mondego.

- Baptista *et al* (1995) para além de se ter feito uma caracterização hidrodinâmica geral do sistema, procedeu a um enquadramento geomorfológico do estuário com a identificação e distribuição espacial: dos vários ambientes e fácies sedimentares, das formas de fundo dos canais, dos ambientes dinâmicos e da diversidade biológica.

- Duarte *et al*, 2000 apresenta um estudo relativo à propagação não linear da onda de maré e à circulação hidrodinâmica no estuário do Mondego com recurso à técnica da análise harmónica. Comparou os períodos e as velocidades máximas das fases da enchente e vazante em quatro sectores do estuário e analisou a variação de amplitudes das constituintes M_2 e M_4. Determinando que sob baixos regimes fluviais, a distorção relaciona-se fundamentalmente com o atrito de fundo e que o sistema se comporta como um estuário de domínio da enchente.

3.2. Trabalhos Realizados por Outros Autores no Estuário

Com o objectivo de elaborar uma breve síntese dos trabalhos e dos conhecimentos relacionados directa ou indirectamente com a dinâmica estuarina e o transporte sedimentar, seleccionaram-se algumas das publicações consideradas mais relevantes para o estado actual dos conhecimentos no estuário do Mondego.

Nesta matéria, o estuário do Mondego tem vindo a ser estudado desde a década de sessenta do século passado, com a realização dos primeiros trabalhos relativos à dinâmica sedimentar com

traçadores radioactivos efectuados pelo LNEC e que serviram de base à construção dos molhes externos actuais da embocadura.

- Ferreira & Cunha (1970) para além de terem caracterizado o regime hidrológico do Mondego, estimaram várias modalidades do transporte sedimentar no rio Mondego, para a região de Coimbra e Vila Pouca, que foram correlacionados com os modelos de Meyer-Peter and Muller e Einstein-Barbosa. Estimaram para estas duas estações os caudais sólidos totais, que foram da ordem dos $223x10^3m^3$/ano e dos $95x10^3m^3$/ano, respectivamente.

- LNEC (1977) fez um estudo sobre a variação da linha de costa a Sul da embocadura do estuário do Mondego, identificando um recuo generalizado da praia da Gala da ordem dos 7.2m/ano. Define a agitação marítima, o regime de marés, uma caracterização petrográfica deste troço de praia e faz uma estimativa do transporte sólido longilitoral na zona Sul da Figueira, para vários quadros de altura e período de ondulação, recorrendo ao modelo modificado de Carvalho, 1971 *in* LNEC (1977). Concluiu, que aquele terá sido da ordem dos $2.06x10^5m^3$/ano.

- O trabalho da Direcção Geral de Portos (1990), consistiu num estudo de impacte ambiental da Regularização da Zona Estuarina de Transição entre o Porto da Figueira de Foz e o Troço Terminal de Regularização do Baixo Mondego, ou seja, no braço norte. De entre vários assuntos tratados por este trabalho, destaca-se uma caracterização hidrodinâmica feita para o estuário fundamentada num modelo matemático, tendo por base as alturas de maré tabeladas e as descargas do Mondego em Coimbra. Deste modelo também resultaram estimativas do transporte sedimentar que determinaram que a resultante do transporte sólido se fazia no sentido rio-mar. Descreveram também vários ambientes sedimentares, designadamente as zonas de sapal, bancos de vasa e areia, praias e dunas de areia costeiras, ilhotas isoladas.

Os conhecimentos oceanográficos deste sistema costeiro sofreram um grande impulso a partir de 1989, com a execução de trabalhos e divulgação dos resultados sob a forma de relatórios e publicações científicas no âmbito de um projecto de investigação interdisciplinar "Lançamento de

Bases para o Estudo Integrado do Estuário do Mondego", no qual esta tese de Doutoramento se enquadra.

- Enumeram-se os trabalhos de Santos *et al* (1990, 1991) onde descreveram a agitação marítima e o contexto hidrodinâmico à entrada do estuário. O estudo da propagação da agitação marítima no sector distal do estuário restringiu-se aos trabalhos desenvolvidos por Almeida (1992), também publicados em Baptista *et al* (1995), que identificou formação de um tipo de ondulação invulgar, responsável por sérios danos nos navios fundeados no Porto comercial da Figueira da Foz, designada localmente de mareta. Esta, corresponde a uma onda com uma altura compreendida entre 3-5m, que adquire rumos de 267°-302° junto ao Cais comercial, com períodos de 11.5-17.5 segundos. Resulta da difracção e refracção da agitação marinha no sector portuário do estuário com rumos de SW a W ao largo. É mais frequente e significativa nos meses de Novembro a Março, e apresenta uma maior expressividade durante as preia-mares.

- Os primeiros trabalhos relativos à propagação da maré no interior do estuário remontam à década de noventa com Baptista (1990) e também publicados em Baptista *et al* (1995), baseados na variação longitudinal de várias constituintes harmónicas astronómicas e de baixa profundidade, algumas delas representadas no quadro 3.1. Fundamentaram-se na obtenção de registos contínuos da variação da superfície livre em seis estações dispostas em vários sectores no estuário e zona costeira adjacente[18], expressas na figura 3.1, entre Junho de 1989 e Junho de 1990.

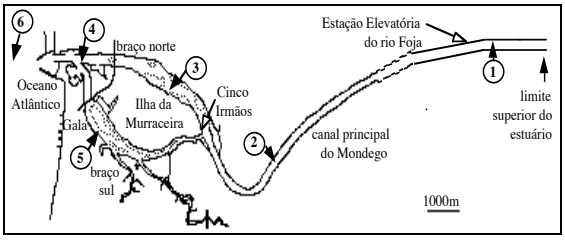


Figura 3. 1. Localização geográfica das estações de amostragem definidas em Baptista (1990) e em Baptista *et al* (1995). As estações localizadas no canal principal, 1, 2, 3 e 4 distaram da foz do estuário ≈17km, ≈12km, ≈5.5km e ≈1.6km. A do braço sul (estação 5) distou 4.1km. A estação 6 situada ao largo da foz foi simbolicamente posicionada a ≈-1km da foz.

[18]. Foram efectuadas medições pontuais na coluna de água dos seguintes parâmetros: pressão, condutividade e temperatura, com espaçamento temporal de 30 minutos ao longo de um ano, com auxílio de marégrafos "Space Technology DNW-5M", nas estações 1 a 5 do estuário. A estação maregráfica 6 pertenceu ao Instituto Hidrográfico e localizou-se aproximadamente a 1km a Oeste no molhe morte da embocadura e referenciada em Almeida (1989).

Do tratamento harmónico efectuado a estas séries de dados realçam-se as considerações tidas pelo referido autor, consideradas mais relevantes para o corrente trabalho. As constituintes astronómicas semidiurnas (sobretudo a M_2, mas também S_2 e N_2) foram predominantes nas 6 estações, e encontravam-se de acordo com o carácter global semidiurno da maré na Costa Ocidental Portuguesa. As componentes astronómicas diurnas, lunar, e solar, foram identificadas nas 6 estações. As constituintes tetradiurnas, hexadiurnas, e octodiurna adquiriram maior importância para o interior do estuário, comportamento este, que foi consistente com a diminuição da profundidade do mesmo. Das constituintes tetradiurnas analisadas, M_4 concentrou a maior parte da energia, derivando directamente da componente M_2. As componentes MS_4 e MN_4 concentram também uma energia importante, evidenciando importantes interacções entre M_2 com a S_2 e com N_2, respectivamente.

Quadro 3. 1. Amplitudes e fases das constituintes harmónicas M_2, S_2, K_1, O_1 e M_4, obtidas por Baptista (1990) e em Baptista *et al* (1995).

		estação 1		estação 2		estação 3		estação 4		estação 5		estação 6	
Constituintes	Período	Amplitude	fase	Amplitude	fase	Amplitude	fase	Amplitude	fase	Amplitude	fase	Amplitude	fase
harmónicas	(h)	(m)	(º)	(m)	(º)	(m)	(º)	(m)	(º)	(m)	(º)	(m)	(º)
M2	12,42	0,79	313	0,73	297	0,79	285	0,88	284	0,91	282	1,00	44
S2	12,00	0,27	155	0,24	135	0,28	111	0,32	106	0,33	109	0,35	132
K1	23,93	0,07	91	0,07	82	0,06	67	0,07	59	0,07	60	0,07	72
O1	25,82	0,07	212	0,06	199	0,06	191	0,06	187	0,07	184	0,07	272
M4	6,21	0,13	212	0,12	178	0,06	185	0,02	155	0,03	4	-	-

Uma vez que parte da informação hidrodinâmica obtida no âmbito deste trabalho fundamentou-se em parte nas previsões maregráficas elaboradas pelo Instituto Hidrográfico, foi solicitado a esta instituição a comunicação das amplitudes e fases das constituintes harmónicas M_2, S_2, K_1 e O_1, referentes ao marégrafo localizado no Cais de serviços (Lat.40°08'.8N; Long.8°51'.3W) durante o período compreendido entre 31/03/1984 e 4/04/1985 (quadro 3.2). Constituintes estas que servem de base às tabelas de marés publicadas por esta instituição (Instituto Hidrográfico, 1986; Instituto Hidrográfico, 1993).

Quadro 3. 2. Amplitudes e fases das constituintes harmónicas M_2, S_2, K_1 e O_1, gentilmente fornecidas pelo Instituto Hidrográfico, obtidas do marégrafo localizado no Cais de serviços (Lat.40°08'.8N; Long.8°51'.3W).

Constituintes harmónicas	Amplitude (m)	fase (º)
M2	1.02	60
S2	0.36	42
K1	0.07	139
O1	0.06	29

Referem-se os trabalhos Dinis & Cunha (1998) e Cunha & Dinis (2000) que identificaram várias acções antrópicas no estuário do Mondego e na zona costeira adjacente, e comentam as suas implicações quanto a aspectos sedimentares e na qualidade ambiental. Também o trabalho de Cunha & Dinis (2002) que se baseou na colheita de amostras de sedimento de superfície em vários sectores do estuário e na elaboração de dois perfis de vários parâmetros físicos, longitudinalmente aos dois canais do estuário em fase final da enchente. Estes dois foram realizados aquando de uma maré viva e uma maré morta, sob baixos regimes do Mondego. A recolha destes dados reportaram a actividades de campo compreendidas entre os anos de 1994 e 1996. Embora tenham identificado comportamentos hidrodinâmicos distintos nos dois braços, essa descrição já se encontrava feita em Duarte & Reis (1991a), Duarte & Reis (1993) e em Baptista *et al* (1995). Sugeriram também um padrão geral de circulação da água doce/salgada no estuário, bem como, uma distribuição espacial dos sedimentos superficiais pouco diferente das anteriormente descritas em Duarte (1989), Duarte & Reis (1991a), Reis & Duarte (1990) e Baptista *et al* (1995). Foi apresentado e descrito um mapa com a distribuição espacial da granulometria dos sedimentos de superfície colhidos nesses dois anos de amostragem. Apresentaram igualmente estimativas dos volumes líquidos e sólidos medidos em Coimbra, antes e depois da construção do Açude Ponte de Coimbra, determinados pela Direcção Geral de Recursos e Aproveitamentos Hídrico e publicados em 1987, com os quais calcularam as diferenças destes volumes e estimaram o caudal sólido de fundo que transitou para o Baixo Mondego que terá sido da ordem dos $26.5 \times 10^3 m^3$/ano.

Realça-se o grande contributo que o trabalho de Duarte *et al* (2002) teve para o tema desta tese de doutoramento, ao estimar os prismas de maré e os tempos de residência para o braço sul

com a finalidade de estudar "macroalgal blooms". Para tal, recorreu ao modelo numérico de diferenças finitas, designado de DUFLOW, em 1D, tendo por condições de fronteira resultados maregráficos locais obtidos apartir de perfis de velocidade e da variação da superfície livre obtidos junto à ponte da Gala e num levantamento batimétrico vectorizado.

A Junta Autónoma do Porto da Figueira da Foz afim de minorar o assoreamento do sector portuário tem vindo a executar regularmente trabalhos de dragagem no estuário. Entre os anos de 1988 a 1993 retirou (foram removidos) volumes de inertes de aproximadamente 300000m^3 em 1988, 225000m^3 em 1989, 200000m^3 em 1990, 210000m^3 em 1991, 151000m^3 em 1992, e cerca de 50000m^3 em 1993 (Baptista *el al*, 1995).

CAPÍTULO 4. MATERIAIS e MÉTODOS

Neste capítulo descrevem-se os dados obtidos durante as actividades de campo, os instrumentos usados, e a maneira como foram recolhidos e posteriormente tratados. Definem-se os critérios usados para a delimitação da área de estudo. Justificam-se e descrevem-se os métodos de campo, de laboratório e de tratamento matemático dos dados, bem como, dos materiais utilizados. Expõem-se os pressupostos e considerações adoptados para o tratamento dos dados.

4.1. Métodos de Campo

4.1.1. Distribuição Espacial dos Pontos de Amostragem no Estuário

Para se proceder ao estudo hidrodinâmico e ao transporte sedimentar no estuário do Mondego, restringiu-se a área de estudo ao sector compreendido entre as extremidades dos molhes externos da embocadura, e a montante, o limite superior da maré dinâmica, que coincidiu com o açude localizado a ≈1km a montante da Ponte de Formoselha (figuras 2.2 e 4. 1). Na zona costeira adjacente à sua foz, não se considerou o sector abrangido pela pluma túrbida, dada a impossibilidade de navegação neste local com a embarcação usada para as actividades de campo (*vidé* figura 4. 4). Definida a área de estudo, houve necessidade de definir vários pontos de amostragem neste sistema estuarino, afim de permitiram proceder a estudo hidrodinâmico, e sedimentar do mesmo. Para o primeiro, escolheram-se quatro locais, ou estações, para se proceder ao estudo de séries temporais (figura 4. 2), enquanto para os estudos de variação espacial escolheram-se vários pontos de amostragem dispostos longitudinalmente aos canais mais importantes do estuário. Estes locais de amostragem apresentaram distâncias relativas entre si sensivelmente equidistantes, mas dependentes de elementos paisagísticos de referência posicionados em ambas as margens dos canais afim de permitirem o posicionamento da embarcação, recorrendo aos respectivos alinhamentos e/ou enfiamentos. No canal principal do estuário, com ambientes sempre imersos, e sujeitos à

variação da superfície livre, enquanto no braço sul também abrangeram ambientes intermareais. Os locais de amostragem usados para estudar a componente sedimentar do estuário, coincidiram com os usados para a hidrodinâmica (descritos anteriormente), acrescidos de outros pontos localizados noutros domínios intermareais e também supramareais mas que foram inundados aquando de cheias ou aquando de fenómenos de storm surge (estes ambientes encontram-se descritos no item 5.1.3, e expressos no quadro 5.1.3). Para além destes ambientes estuarinos, houve necessidade de amostrar parâmetros físicos e sedimentares nos ambientes marinho e fluvial adjacentes ao estuário.

Figura 4. 1. Limite superior do estuário, correspondente a um açude de enrocamento com disposição transversal ao canal do Mondego, localizado a ≈1km a montante da Ponte de Formoselha.

Estações de Amostragem onde se Mediram Séries de Dados de Ciclos Completos de Maré

Foram definidas quatro estações localizadas em diferentes sectores dinâmico-sedimentares do estuário, identificadas na figura 4. 2 (Duarte & Reis, 1993). Cada estação foi composta por três pontos de amostragem dispostos segundo a secção transversal do canal. Um destes pontos localizou-se no centro do canal e os dois restantes lateralmente ao anterior, posicionados segundo o plano perpendicular ao desenvolvimento longitudinal do canal em estudo (*vidé* figura 4. 3). Estes três pontos de amostragem permitem caracterizar diversos parâmetros físicos e sedimentares para cada secção transversal do respectivo canal, quando aplicada a metodologia descrita por Kjerfve & Seim (1984).

A estação mais próxima da foz correspondeu à Embocadura (Emb), que dista 1.3km da boca do estuário. Ficou enquadrada no sector proximal do canal principal, aproximadamente a 50m a jusante do início da confluência distal entre os braços norte e sul, num sector do estuário completamente regularizado. Esta estação foi definida por uma secção transversal do tipo trapezoidal, em que o ponto de amostragem [E(M)] se posicionou no centro do canal e os [E(N)] e [E(S)] posicionaram-se respectivamente a norte e a Sul do primeiro, como se representa na figura 4. 3. Tendo como referência o fundo, E(M) distou sensivelmente ≈80m das margens, enquanto [E(N)] e [E(S)] distaram ≈20m e ≈30m das margens. Considerou-se que os parâmetros medidos nestes 3 pontos foram representativos da variabilidade natural na secção transversal do canal, tendo em consideração as respectivas subáreas de influência, que pelo método definido por Kjerfve & Seim (1984), permitiram a determinação de valores médios para toda a secção transversal, ou só para determinados sectores da secção (designadamente, parâmetros médios junto ao fundo ou à superfície). Uma vez posicionada no sector distal do estuário, esta estação terá representado as condições hidrodinâmicas e os processos sedimentares dominantes deste sector.

Importa realçar que no âmbito deste trabalho designou-se de "Embocadura" ou de "embocadura", quando se pretendeu referir quer à estação da Embocadura, quer ao sector mais distal do estuário, representado pelo troço de canal principal compreendido entre a extremidade dos molhes externos da foz e a bifurcação distal do braço norte com o sul (*vidé* quadro 2.1 e figura 2.2).

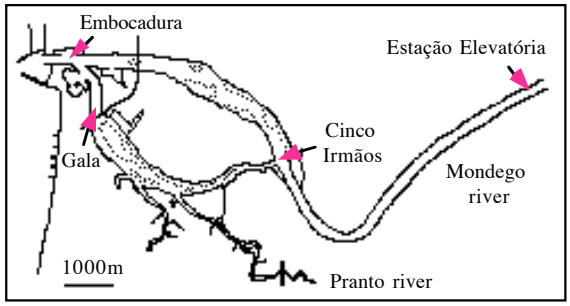


Figura 4. 2. Localização geográfica das quatro estações do estuário. A estação da Embocadura (Emb), dos Cinco Irmãos (5I), estação Elevatória (EE) e estação da Gala (G).

A estação dos Cinco Irmãos (5I) localizou-se no canal principal a 7.5km da foz, junto à confluência proximal dos braços norte e sul (figura 4. 2). Posicionou-se na zona de transição entre o Leito Regularizado do Baixo Mondego e o braço norte. Foi caracterizada por uma secção transversal semelhante a um trapézio assimétrico, antes das obras de regularização, e por uma secção trapezoidal simétrica com a regularização de todo o braço norte. Tendo como referência o fundo, em média o ponto central de amostragem, o [5i(M)], posicionou-se sensivelmente a ≈160m da margem direita e ≈130m da margem esquerda, e com a regularização passou a posicionar-se a cerca de ≈95m de ambas as margens. Os restantes pontos, o [5I(N)] e o [5I(S)] posicionaram-se em média a ≈60m e a ≈30m da margem. Após a regularização passaram a distar cerca de ≈20m. Antes da regularização, considerou-se que os parâmetros medidos nesta estação foram apenas representativos da dinâmica e do transporte sedimentar de segmentos adjacentes a montante e a jusante do canal, nomeadamente de parte do sector proximal do braço norte e do sector distal do LRBM, dadas as semelhanças morfológicas e batimétricas apresentadas por eles (figura 2.2, quadro 2.1). Após a regularização do braço norte a área de representatividade da estação dos Cinco Irmãos aumentou, passando a considerar-se que representou todo o sector proximal do braço norte e o distal do LRBM.

A estação Elevatória (EE) correspondeu à estação mais interior do estuário ao distanciar-se 15.5km da foz e ao posicionar-se cerca de 150m a montante da estação Elevatório do rio Foja, já no Leito Regularizado do Baixo Mondego. A sua secção trapezoidal regularizada, foi definida por uma grande simetria. Tendo como referência o fundo, o ponto central de amostragem, o [EE(M)] posicionou-se sensivelmente a ≈110m de cada margem, enquanto os restantes pontos, o [EE(N)] e o [EE(S)] posicionaram-se em média a ≈30m da margem. Dadas as grandes semelhanças fisiográficas apresentadas pelo troço LRBM e a localização desta estação numa posição quase central entre os sectores médio e proximal do

Leito Regularizado do Baixo Mondego, os parâmetros e as propriedades físicas medidas na EE consideraram-se representativas destes dois sectores do estuário (quadro 2.1 e figura 2.2).

A estação da Gala localizou-se no braço sul, sensivelmente a 3km da foz e a ≈50m a jusante da ponte da Gala. Posicionou-se na extremidade superior do sector distal do braço sul praticamente na transição com o sector médio. Foi também definida por uma secção transversal regularizada. O ponto de amostragem central nesta estação G(M) posicionou-se sensivelmente a ≈100m de ambas as margens (junto ao fundo), e os pontos laterais, o G(N) e o G(S) respectivamente a ≈30m. Considerou-se que as medições dos parâmetros medidos nesta estação foram representativos dos sectores distal e parte do médio do braço sul.

Medições de Parâmetros

Em cada um dos três pontos de amostragem, que compuseram cada uma das quatro estações, foram medidos ao longo da coluna de água, vários parâmetros físicos e sedimentológicos. Estes corresponderam à profundidade relativa, à componente longitudinal da velocidade da corrente, a temperatura, a condutividade eléctrica (salinidade), a turbidez e a altura da coluna de água. Foram também medidos os teores em oxigénio, pH e Eh. Cada um destes perfis foi constituído por leituras destes parâmetros que distaram relativamente ao fundo, 0.1m, 0.5m, 1.5m, 2.5m, ... e sucessivamente espaçadas 1m entre si até à superfície, local onde se procedeu à última leitura que se realizou a 0.1m desta. Para cada série de dados, de cada estação, foram lidos vários destes perfis verticais (na coluna de água) ao longo de um ciclo completo de maré, com intervalos irregularmente espaçados no tempo, tentando sempre que possível efectuá-las de uma forma sequenciada nos 3 pontos de leitura. Desta forma, em cada estação, foi obtida uma série destes dados maregráficos representativos da variabilidade natural, quer transversal ao canal, quer temporal. Aquando da realização destes perfis, com a leitura dos referidos parâmetros, foram também recolhidas amostras de água junto ao fundo, à superfície e a meio do escoamento, afim de se determinar a concentração de partículas em

suspensão com um amostrador do tipo van Dorn, recorrendo ao processo de filtragem. Também foi medido o transporte sedimentar de fundo, e na coluna de água recorrendo a dois amostradores específicos. Durante o ciclo de maré também foi colhida uma amostra de sedimento de fundo com recurso a uma draga do tipo van veen.

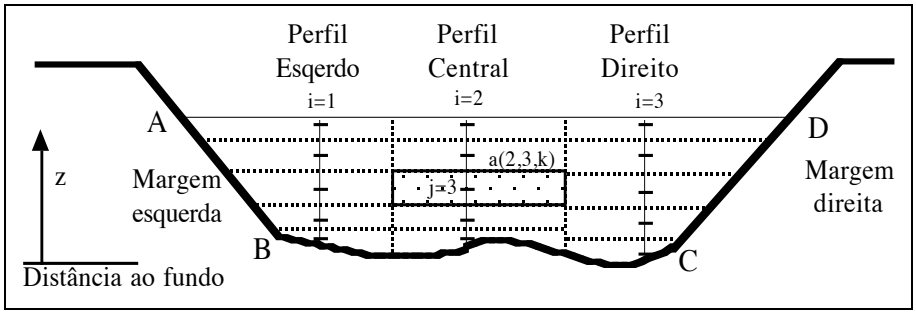


Figura 4. 3. Esquema de uma secção transversal de um canal trapezoidal. Ilustração da subárea a(2,3,k) da respectiva secção transversal.

A realização destas actividades de campo contou com a utilização de uma embarcação, que em cada ponto de amostragem foi amarrada a uma bóia que por sua vez era fundeada com uma poita. O comprimento do cabo decorrente entre a poita e a bóia para cada ponto de amostragem foi sucessivamente ajustado à variação da altura da coluna de água, bem como, alterada a sua posição durante a enchente e a vazante de forma a que as medições dos vários parâmetros efectuadas ao longo de cada ciclo de maré, tenham sido efectuadas sempre tanto quanto possível, no mesmo local.

Figura 4. 4. Embarcação usada nas actividades de campo (IMAR-Coimbra).

As leituras dos vários parâmetros físicos foram simultâneas, tendo sido feitas com auxílio de uma estrutura que acoplava todas as respectivas sondas, e se orientava sempre

contra à direcção dominante da corrente. Esta apresentava um sistema simples que a permitia subir, descer e estabilizar numa determinada profundidade, sempre segundo uma direcção perpendicular à superfície livre (figura 4. 5). A estrutura movimentava-se ao longo de um cabo que era mantido sempre esticado e na vertical com auxílio de um peso em chumbo na extremidade, que por sua vez tinha um sistema de fixação ao sedimento estuarino.

As leituras da velocidade executaram-se apenas segundo a componente longitudinal, com auxílio de um molinete (*vidé* figura 4. 5) medidas de acordo com Loureiro (1980). Para cada leitura da velocidade no estuário, considerou-se um período de integração (t) aproximado a 1 minuto (tempo necessário para que a velocidade da corrente lida no correntómetro estabilizasse), tal que: $\bar{u}_{(z)} = \int_{t_o}^{t_o+1} u(z,t)dt$, em que (t_o) correspondeu ao tempo inicial da leitura e $u_{(z,t)}$ às velocidades instantâneas lidas em função da batimetria (z) e do tempo (Kjerfve, 1979). Este foi calibrado num tanque experimental de ensaio no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

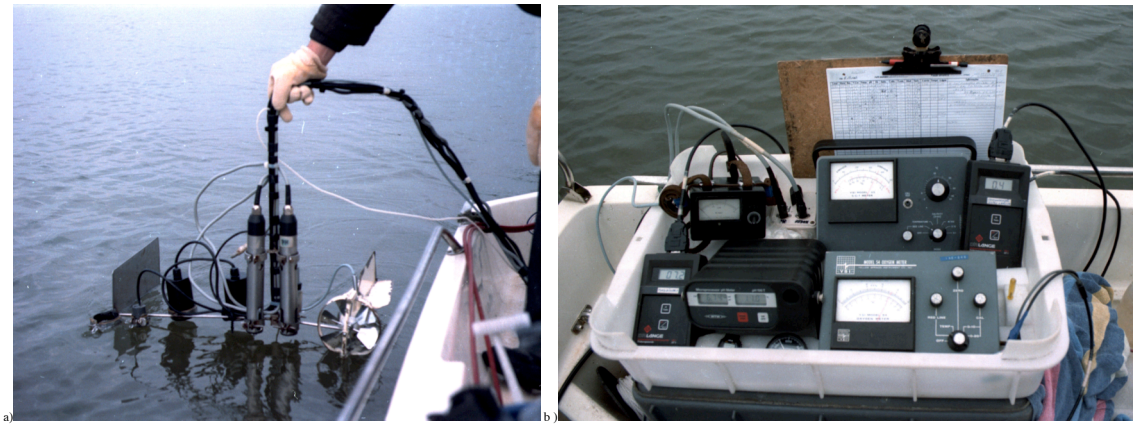


Figura 4. 5. Aparelhos usados na medição de parâmetros físicos no estuário. A fotografia a) mostra a estrutura que integra todas as sondas usadas para a medição de parâmetros físicos. Da esquerda para a direita, sonda de medição da temperatura e condutividade eléctrica, as duas seguintes corresponderam a sondas para a medição da distância relativa ao fundo, turbidez e concentração de partículas em suspensão. As duas posicionadas no centro da figura mediam a temperatura, pH, Eh e teor em oxigénio. No lado direito encontra-se o molinete usado para medir a componente horizontal da velocidade. A fotografia b) mostra os respectivos equipamentos. De trás para a frente e da esquerda para a direita correspondem: ao mostrador analógico do correntómetro; ao aparelho de medir a temperatura e condutividade eléctrica, e o terceiro ao turbidímetro e medidor da profundidade relativa na coluna de água. Na linha da frente, estão a sonda de medição de concentração de partículas em suspensão, o aparelho de medição do Eh, pH e potencial redox; e por fim o aparelho de medir o teor em oxigénio na água.

As leituras da temperatura (T) da água em circulação no estuário foram expressas em graus Celcios (ºC). As medições da salinidade (S) foram feitas com base na condutividade eléctrica (dependente da salinidade e da temperatura) de acordo com Kjerfve (1979) e Lewis & McConchie (1994), tendo sido expressa em ‰.

As actividades de campo foram desenvolvidas no estuário, enquadradas em "campanhas", tendo cada uma, consistido na recolha de uma série de dados referente a uma das estações, em dias tanto quanto possível consecutivos. Obtendo assim 4 séries de dados de parâmetros físicos, sedimentares e relativos ao transporte, respeitantes a quatro ciclos de maré localizados em sectores distintos do estuário.

Uma vez ter sido impossível a obtenção de séries de dados maregráficos simultâneas no tempo para as quatro estações do estuário, optou-se por realizar medições destes parâmetros em duas das estações, medindo dois ciclos completos de maré que tiveram lugar em dois dias consecutivos, seguidos de um dia de interregno para proceder a reparações e calibrações nos instrumentos e recuperar forças. Nos dois dias subsequentes procedeu-se à obtenção de mais duas séries de dados maregráficos nas restantes estações. Muito embora a diferença de tempo decorrente entre ciclos de maré de cada campanha, possa ter atingido os 2-3 dias, consideraram-se as séries de cada campanha como contemporâneas. Contudo, nem sempre foi possível em cada campanha obter as quatro séries, por várias razões, designadamente, relacionadas com a avaria de equipamento, cansaço da tripulação, condições adversas quer de navegabilidade, quer meteorológicas, onde se destacam o nevoeiro intenso, hidrodinamismo muito elevado, agitação capilar associada a vento muito forte. As campanhas de campo e as séries de dados recolhidas no estuário encontram-se representadas no quadro 4. 1.

Campa-nhas	Embocadura (Emb)	Cinco Irmãos (5I)	Estação Elevatória (EE)	Gala (G)
6/12/91				G61291, com início às 8h39m e *terminus* às 21h24m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=2h38m. Amostrados os perfis G1-G22, sob $A_{w,IH}$=2.3m e $Q_{r,APC}$=12m^3/s. Vaga marinha. Decorreu sob um vento fraco do quadrante N, formando-se agitação capilar.
18-20/12/91	E181291, com início às 11h48m e *terminus* às 12h32m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=5h55m. Amostrados os perfis E1-E5, sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=11m^3/s. Vaga marinha.	5I191291, com início às 8h18m e *terminus* às 20h37m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=6h48m. Amostrados os perfis 5I1-5I5, sob $A_{w,IH}$=2.3m e $Q_{r,APC}$=10m^3/s.		G201291, com início às 8h39m e *terminus* às 21h24m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=7h38m. Amostrados os perfis G1-G40, sob $A_{w,IH}$=2.6m e $Q_{r,APC}$=8m^3/s.
5-8/03/92	E80392, com início às 6h43m e *terminus* às 23h13m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=4h53m. Amostrados os perfis E6-E16, sob $A_{w,IH}$=2.5m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s.	5I70392, com início às 5h52m e *terminus* às 17h46m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=4h21m. Amostrados os perfis 5I12-534, sob $A_{w,IH}$=2.6m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s.		G50392, com início às 9h32m e *terminus* às 20h18m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=4h21m. Amostrados os perfis G41-G57, sob $A_{w,IH}$=2.6m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s.
14-16/03/92	E150392, com início às 6h23m e *terminus* às 20h00m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=0h16m. Amostrados os perfis E17-E44, sob $A_{w,IH}$=1.6m e $Q_{r,APC}$=5.2m^3/s.	5I140392, com início às 6h01m e *terminus* às 18h29m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=0h06m. Amostrados os perfis 5I35-554, sob $A_{w,IH}$=1.6m e $Q_{r,APC}$=5.2m^3/s.		G160392, com início às 7h31m e *terminus* às 19h02m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=0h43m. Amostrados os perfis G58-G85, sob $A_{w,IH}$=2.6m e $Q_{r,APC}$=4.1m^3/s.
4-7/02/93	E70293, teve início às 9h17m e *terminus* às 23h05m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=3h15m. Foram amostrados os perfis E45-E60, sob $A_{w,IH}$=2.9m e $Q_{r,APC}$=138m^3/s. A pressão atmosférica rondou os 1037mbar.	5I40293, com início às 9h15m e *terminus* às 21h36m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=2h31m. Amostrados os perfis 5I55-572, sob $A_{w,IH}$=2.1m e $Q_{r,APC}$=57.4m^3/s. A pressão atmosférica rondou os 1036mbar. A draga encontrava-se inactiva a 150m para montante desta estação.		G60293, com início às 9h08m e *terminus* às 19h23m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=3h09m. Amostrados os perfis G86-G105, sob $A_{w,IH}$=3m e $Q_{r,APC}$=38.2m^3/s. A pressão atmosférica rondou os 1036mbar.
19-22/05/93	E190593, com início às 8h55m e *terminus* às 22h40m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=3h15m. Amostrados os perfis E61-E75, sob $A_{w,IH}$=2.1m e $Q_{r,APC}$=118m^3/s. Realizou-se sob forte pluviosidade e ao final da tarde levantou-se uma trovoada. Apartir das 12.35h levantou-se um vento de W responsável pela formação de uma pequena vaga capilar que se propagou para o interior do braço norte. A pressão atmosférica rondou os 1020mbar. A agitação marinha foi de "vagas pequenas".		EE220593, com início às 7h13m e *terminus* às 19h30m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=5h09m. Amostrados os perfis EE1-EE29, sob $A_{w,IH}$=2.4m e $Q_{r,APC}$=22.2m^3/s. A pressão atmosférica rondou os 1022mbar.	G200593, com início às 8h50m e *terminus* às 22h29m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=3h53m. Amostrados os perfis G106-G128, sob $A_{w,IH}$=1.2m e $Q_{r,APC}$=99m^3/s. A ligação a montante com o braço norte encontra-se bloqueada com as obras de regularização. A pressão atmosférica rondou os 1021mbar.
8-11/08/93	E100893, com início às 9h38m e *terminus* às 22h05m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=9h26m. Amostrados os perfis E76-E92, sob $A_{w,IH}$=1.2m e $Q_{r,APC}$=12.3m^3/s. O mar apresentou-se "chão" durante todo o dia. Por volta das 7.30h levantou-se uma vento de Norte, contrário ao da corrente, provocando uma pequena vaga capilar . A Pressão atmosférica oscilou entre os 1026-1031mbar.	5I80893, com início às 8h22m e *terminus* às 20h44m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=8h02m. Amostrados os perfis 5I73-590, sob $A_{w,IH}$=1.8m e $Q_{r,APC}$=12.3m^3/s. Estação já com a nova fisiografia. Pressão atmosférica oscilou entre os 1029-1031mbar.	EE70893, com início às 7h45m e *terminus* às 20h19m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=7h29m. Amostrados os perfis EE30-EE43, sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=13.5m^3/s. Pressão atmosférica oscilou entre os 1029-1032mbar.	G110893, com início às 9h16m e *terminus* às 23h14m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=10h28m. Amostrados os perfis G129-G146, sob $A_{w,IH}$=1.1m e $Q_{r,APC}$=12.1m^3/s. Pressão atmosférica compreendida entre os 1022-1027mbar.
11-14/11/93	E111193, com início às 8h11m e *terminus* às 20h50m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=1h10m. Amostrados os perfis E93-E106, sob $A_{w,IH}$=2.6m e $Q_{r,APC}$=200m^3/s. Campanha decorreu com mar chão. A pressão atmosférica oscilou entre os 1030-13031mbar. Por volta das 16h53m não foi possível fazer a amostragem em E(M) e E(S), dada a forte velocidade da corrente de vazante que impossibilitou fundear a embarcação com velocidades de superfície superiores a 1.5m/s. As amostras do transporte sedimentar do sector norte desta estação, apresentam muitos flocos de vasa.	5I141193, com início às 9h46m e *terminus* às 0h41m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=3h32m. Amostrados os perfis 5I91-5109, sob $A_{w,IH}$=3.2m e $Q_{r,APC}$=124.4m^3/s. Decorreu sob um nevoeiro cerrado, e sob uma pressão atmosférica de 1030-1034mbar. Estação já com a nova fisiografia.	EE151193, com início às 5h08m e *terminus* às 17h49m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=4h18m. Amostrados os perfis EE44-EE60, sob $A_{w,IH}$=3.3m e $Q_{r,APC}$=126.9m^3/s. A pressão atmosférica oscilou entre os 1031-1034mbar.	G121193, com início às 8h48m e *terminus* às 21h14m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=1h59m. Foram amostrados os perfis G147-G165, sob $A_{w,IH}$=2.9m e $Q_{r,APC}$=190m^3/s. As comportas do rio Pranto foram abertas apenas durante a vazante e início da enchente. A pressão atmosférica rondou os 1029 e os 1030mbar.
5-9/12/93	E81293, com início às 9h02m e *terminus* às 23h45m, hora local. O datum da análise harmónica foi BM_{IH}=4h37m. Amostrados os perfis E107-E122, sob $A_{w,IH}$=1.9m $Q_{r,APC}$=56.6m^3/s. Chuviscou de manhã e à tarde. A pressão atmosférica rondou os 1034-1036mbar. Pelas 14h45m o barco foi arrastado pela corrente forte. Sentiu-se uma pequena vaga marinha.	5I51293, com início às 8h21m e *terminus* às 21h03m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=7h39m. Foram amostrados os perfis 5I110-5126, sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=58.9m^3/s. A pressão atmosférica oscilou entre 10310-1032mbar. Estação já com a nova fisiografia. A draga situava-se inactiva em frente da vidraria da Fontela	5I61293, com início às 9h08m e *terminus* às 18h02m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=8h38m. Foram amostrados os perfis EE61-EE76, sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=56.3m^3/s. A pressão atmosférica oscilou entre os 1033 e os 1035mbar. Dia chuvoso. Com nevoeiro matinal, e vento moderado de SW-E.	G91293, com início às 6h17m e *terminus* às 18h59m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=0h17m. Foram amostrados os perfis G166-G184, sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=58.4m^3/s. A pressão atmosférica oscilou entre os 1035 e os 1036mbar.
3-06/02/95	Estação frente ao Cais Comercial. CC50295, com início às 7h25m e *terminus* às 19h45m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=7h15m. Amostrados os perfis Cc1-Cc11. Por volta das 10h05 não se conseguia fundear o barco devido à forte corrente.	5I40295, com início às 7h26m e *terminus* às 19h45m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=6h36m. Amostrados os perfis 5I127-5149, sob $A_{w,IH}$=2.4m. Estação já com a nova fisiografia.	5I30295, com início às 6h58m e *terminus* às 16h08m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=5h58m. Amostrados os perfis EE77-EE87, sob $A_{w,IH}$=3m.	G60295, com início às 8h04m e *terminus* às 20h36m, hora local. O datum da análise harmónica foi PM_{IH}=7h56m. Foram amostrados os perfis G185-G197, sob $A_{w,IH}$=1.8m.

Quadro 4. 1. Quadro ilustrativo das campanhas e das séries de dados colhidas nas várias estações do estuário. Estas abrangeram vários quadros de altura da maré (A_w) e descargas fluviais (Q_r) e condições meteorológicas.

A escolha dos períodos de tempo para a realização das diferentes campanhas, teve em consideração não só tentar abranger as mais diversificadas alturas da maré e descargas fluviais, mas também o registo destes parâmetros, antes e depois das obras de regularização do braço norte. Contudo, e uma vez que os trabalhos de regularização deste braço coincidiram com a fase final do período estipulado para a realização das actividades de campo (por ter sofrido vários atrasos), houve necessidade de realizar campanhas de campo aquando dos trabalhos de regularização. Eles restringiram-se sempre aos períodos de inactividade da draga, que esteve parada por várias vezes, durante várias semanas, para manutenção. Também não foi possível desenvolver campanhas aquando de quadros hidrodinâmicos considerados extremos (por exemplo aquando de cheias) por ser impossível face aos meios técnicos, logísticos e humanos que se dispunha.

Estações de Amostragem Dispostas Longitudinalmente aos Canais do Estuário

Ao longo do canal principal e do braço sul, foram definidos vários pontos de amostragem, dispostos longitudinalmente aos dois canais principais, quase equidistantes entre si. As posições relativas de cada ponto de amostragem relacionou-se com a presença de pontos fixos próximos das margens do estuário que permitissem fazer a sobreposição de vários alinhamentos e miradas. Nestes locais de amostragem foram medidos parâmetros físicos e a concentração de sedimentos em suspensão ao longo da coluna de água, quer nas fases terminais da enchente, quer da vazante. Permitiram desta forma caracterizar a variação longitudinal no estuário dos vários parâmetros físicos em análise, sob diversificadas condições hidrodinâmicas de alturas de maré e descargas fluviais. Os perfis longitudinais realizados, encontram-se referenciados no quadro 4. 2.

Estações de Amostragem Localizadas nos Ambientes Marinho e Fluvial Adjacentes ao Estuário

Em períodos contíguos e próximos aos das campanhas de campo realizadas nas quatro estações do estuário e aos dos perfis longitudinais aos dois canais do estuário, foram medidos

os mesmos parâmetros no ambiente marinho e fluvial adjacentes ao estuário do Mondego. No mar só se procederam a leituras quando as condições de agitação ao largo o permitiu, dadas as limitações de saída e entrada da barra do porto com a embarcação usada. Paralelamente a estas, e também para caracterizar a massa de água marinha, alguns destes parâmetros foram medidos em diversos locais ao longo das praias adjacentes à foz do Mondego, a Norte e a Sul, tendo-se procedido às leituras de temperatura e salinidade (condutividade eléctrica) próximo da zona de rebentação, com 0.5m na coluna de água. No rio Mondego, foram efectuados perfis verticais destes parâmetros nas várias pontes localizadas entre o estuário e o Açude de Ponte em Coimbra, inclusive.

Campanhas	**Data e horas de início-fim**	**Altura maré; Caudais fluviais**	**Fase da maré**	**Observações de campo**
P106-P115; no Canal Principal	Realizado em 6/06/93. Iniciou-se com o perfil P106 no ponto de amostragem Bn12, às 17h45m. Terminou no ponto Bn19, às 19h35m, com o perfil P115.	$A_{w,IH}$≈2.6m; $Q_{r,APC}$≈24m^3/s.	Final da enchente.	
P78-P90; no Canal Principal	Realizado em 16/05/93. Iniciou-se com o perfil P78 no ponto de amostragem Bn2, às 11h22m. Terminou no ponto Bn20, às 15h28m, com o perfil P90.	$A_{w,IH}$≈1.4m; $Q_{r,APC}$≈44m^3/s.	Final da enchente.	A confluência proximal entre os braços norte e sul encontra-se bloqueada (obras de regularização). Pressão atmosférica rondou os 1025mbar. Entre a Bn6 e a Bn12 registou-se uma pequena vaga capilar que resultou da interacção entre um vento moderado de SE e a corrente contrária.
P116-P130; no Canal Principal	Realizado em 15/08/93. Teve inicio com o perfil P116 no ponto de amostragem Bn2, às 12h20m. Terminou no ponto Bn22, às 15h54m, com o perfil P130.	$A_{w,IH}$≈2.2m; $Q_{r,APC}$≈13m^3/s.	Final da enchente.	A draga situava-se junto ao ponto de amostragem Bn10.
P170-P175; no Canal Principal	Realizado em 22/12/93. Iniciou-se com o perfil P170 no ponto de amostragem Bn3, às 10h03m. Terminou no ponto Bn13, às 11h17m, com o perfil P175.	$A_{w,IH}$≈1.2m; $Q_{r,APC}$≈103m^3/s.	Final da enchente.	A pressão atmosférica rondou os 1037mbar.
P155-P164; no Canal Principal	Realizado em 11/12/93. Teve inicio com o perfil P155 no ponto de amostragem Bn2, às 15h42m. Terminou no ponto Bn14, às 17h42m, com o perfil P164.	$A_{w,IH}$≈2.4m; $Q_{r,APC}$≈91m^3/s.	Final da enchente.	Tempo muito chuvoso. Pressão atmosférica rondou os 1031 a 1032mbar. A draga encontra-se sem laborar junto à vidraria da Fontela.
P91-P105; no Canal Principal	Realizado em 16/05/93. Iniciou-se com o perfil P91 no ponto de amostragem Bn19, às 16h08m. Terminou no ponto Bs1, às 19h40m, com o perfil P105.	$A_{w,IH}$≈1.4m; $Q_{r,APC}$≈44m^3/s.	Final da vazante.	Entre os pontos de amostragem BN19 e Bn14 registou-se uma pequena vaga capilar em resultado de um vento moderado de NW, que soprava em sentido oposto ao da vazante.
P150-P154; no Canal Principal	Realizado em 1/12/93. Teve inicio com o perfil P150 no ponto de amostragem Bn8, às 11h06m. Terminou no ponto Bn4, às 11h53m, com o perfil P154.	$A_{w,IH}$≈2.4m; $Q_{r,APC}$≈91m^3/s.	Final da vazante.	Tempo muito chuvoso. Pressão atmosférica rondou os 1031 a 1032mbar. Ondulação marinha significativa. A draga encontra-se sem laborar junto à vidraria da Fontela.
P6-P12; no Braço sul	Realizado em 8/12/91. Iniciou-se com o perfil P6 no ponto de amostragem Bs6, às 12h09m. Terminou no ponto Bs1, às 13h06m, com o perfil P11.	$A_{w,IH}$≈2.2m; $Q_{r,APC}$≈1.5m^3/s.	Final da enchente.	
P60-P68; no Braço sul	Realizado em 15/05/93. Teve inicio com o perfil P60 no ponto de amostragem Bs1, às 11h44m. Terminou no ponto Bs9, às 13h23m, com o perfil P68.	$A_{w,IH}$≈1.2m; $Q_{r,APC}$≈5.4m^3/s.	Final da enchente.	
P69-P77; no Braço sul	Realizado em 1/12/93. Iniciou-se com o perfil P69 no ponto de amostragem Bs9, às 14h30m. Terminou no ponto Bs1, às 16h27m, com o perfil P77.	$A_{w,IH}$≈1.2m; $Q_{r,APC}$≈5.4m^3/s.	Final da enchente.	

Quadro 4. 2. Perfis longitudinais realizados no canal principal (CP) e ao longo do braço sul (BS), sob várias alturas da maré (A_w) e descargas fluviais (Q_r). As campanhas de campo decorreram em períodos de manutenção da draga.

A localização destes pontos de amostragem teve em consideração não só a acessibilidade dos locais, como também, os meios disponíveis, tendo sempre presente o objectivo de caracterizar a massa de água fluvial. A amostragem nestes dois ambientes, também foi complementada com a recolha de sedimentos do fundo.

Frentes

Durante as actividades de campo foram identificadas zonas de confluência e não mistura entre massas de água com propriedades físicas, químicas e sedimentológicas diferentes (Dippner, 1987). Estas zonas foram designadas de frentes, muito embora localmente sejam apelidadas de fieiros. As frentes no estuário foram identificadas quer com base no registo à superfície de disposições de espuma e de detritos flutuantes, quer identificando massas de água com diferentes sentidos de propagação, com distintos graus de turbidez, com salinidades distintas, de acordo com e Uncles *et al* (1999) e Mied *et al* (2000). Corresponderam a estreitas faixas de largura que não ultrapassaram os 1.5m e com extensões longitudinais que atingiram várias centenas de metros, quando dispostas longitudinalmente a um dos canais principais, ou foram da mesma ordem de grandeza da largura dos canais quando dispostas quase transversalmente aos mesmos. A sua identificação nos diagramas de variação longitudinal das isolinhas dos vários parâmetro físicos efectuados ao longo dos principais braços do estuário, teve em consideração que se encontram relacionadas com sistemas de correntes e associadas a superfícies isopícnicas inclinadas, definindo domínios ligeiramente inclinados e separando águas com características contrastantes, de acordo com Yanagi *et al* (1992).

Estudo da Cobertura Sedimentar de fundo

Executou-se um levantamento aleatório com mais de 100 pontos de amostragem, distribuídos pelo estuário e pelos domínios marinho e fluvial adjacentes abrangendo domínios

submareais, intermareais e supramareais AS (Quadro 5.1.3), visando o conhecimento geral dos diferentes ambientes de sedimentação.

As colheitas das amostras de sedimento nos ambientes supra e intermareais obedeceram a uma metodologia comum, tendo sido recolhidos volumes cúbicos de sedimentos, com dimensões aproximadas de 12x12x12cm. Para a recolha dos sedimentos submareais, usou-se uma draga do tipo "van Veen" com idêntica capacidade volumétrica, recolhendo volumes de sedimento superficial, da ordem dos 10x15x20cm (figura 4. 6).

Figura 4. 6. Fotografia do amostrador de sedimentos de fundo, do tipo "van Veen".

Seguidamente, e ainda numa primeira fase, adoptou-se um outro tipo de amostragem da cobertura sedimentar dos fundos dos canais, que consistiu na colheita de amostras segundo numa malha regular, com auxílio de uma draga van Veen. Definiram-se 14 estações equidistantes entre si e distribuídas ao longo dos braços norte e sul do estuário, onde foram colhidas amostras inframareais durante três anos, nos meses de Dezembro, Março, Junho e Setembro, de maneira a obterem-se registos sedimentares relativos à variação espaço-temporal do substrato móvel do estuário. Fora do estuário, nos ambientes marinho e fluvial adjacentes, também foram colhidas amostras de sedimento.

Numa segunda fase, passou-se a proceder à amostragem de sedimento do fundo dos canais, só que de acordo com a malha mais apertada e também representativa da parte superior do estuário (LRBM). Cada campanha de campo teve uma duração de dois dias, tendo

decorrido durante o Inverno, e a época estival. Estas campanhas de amostragem de sedimento de fundo cessaram aquando do início dos trabalhos de dragagem associados à regularização do braço norte.

Sedimentos em Suspensão

As medições da concentração de sedimentos em suspensão foi feita em vários níveis da coluna de água, nomeadamente junto ao fundo, à superfície e a meio do escoamento, com auxílio de um amostrador do tipo "van Dorn" (water sampler "watertrap", 12.02 da Eijkelkamp), exposta na figura 4. 7. As amostras e água colhidas desta forma foram posteriormente sujeitas a um processo de filtragem para remoção da componente detrítica transportada em suspensão.

Figura 4. 7. Fotografia do amostrador de água do tipo "van Dorn".

Medições do Transporte Sedimentar

As medições do transporte sedimentar, quer em regimes de tracção, quer em suspensão foram realizados com recurso a dois amostradores do tipo "van trap" e "BTAM", desenvolvidos para o efeito (figura 4. 8). Com o primeiro amostrador as medições do transporte sedimentar foram feitas, medindo previamente a velocidade da corrente no nível batimétrico em análise, sendo colocado de seguida o aparelho aberto durante poucos segundos. O tempo de abertura desta armadilha correspondeu ao tempo mínimo para que as partículas que entraram na secção do amostrador (pela parte anterior) não tenham tido tempo

para saírem para fora do mesmo (pela parte posterior). Este amostrador foi usado para medir um transporte considerado de "instantâneo" já que os períodos de medição do transporte sedimentar (de abertura da armadilha) não ultrapassaram os 5 segundos. Já o amostrador BTAM permaneceu no fundo, ou nos vários níveis da coluna de água em análise, "aberto" durante períodos de 60 segundos, pelo que recolheu o sedimento em transporte durante um período considerado muito longo quando comparado com o anterior. Reflectindo desta forma um transporte sedimentar "integrado no tempo". O amostrador van Trap tinha as seguintes dimensões 0.06x0.20x0.50m, enquanto o BTAM tinha uma abertura de secção de 0.06x0.15m.

Figura 4. 8. Amostradores do transporte sedimentar. Fotografia a) amostrador do tipo "van trap". Fotografia b) amostrador do tipo "BTAM".

Levantamentos Batimétricos

As actividades de campo tiveram por base, os levantamentos batimétricos disponíveis à data, que corresponderam ao da Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (1976); Direcção Geral de Portos (1988), (1991), e Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (1995), apresentaram coordenadas Hayford/Gauss Ponto central e cotas referidas ao Zero Hidrográfico, com ZH=-2.00m nível médio (NM) em Cascais.

Trabalhos de Cartografia

Aquando da amostragem aleatória dos sedimentos no estuário distribuídos pelos domínios submareais, intermareais e supramareais, foram executados vários trabalhos de cartografia de superfície, com a identificação dos diversos tipos de sedimento, bem como, com o mapeamento das diversas estruturas sedimentares presentes nos domínios intermareais tanto no braço norte como no braço sul do estuário. Identificou-se também, sempre que possível, a estrutura e a espessura da camada detrítica remobilizada nos domínios intermareais, em especial nas grandes barras do estuário. Estes estudos, também foram complementados com informação obtida quer durante as actividades de campo, quer com trabalhos de foto-interpretação de coberturas aéreas foto e videográficas.

4.2. Tratamento Laboratorial

O trabalho laboratorial foi orientado para a caracterização de vários parâmetros sedimentológicos, qualitativos, semiquantitativos e quantitativos das amostras colhidas no campo e representativas dos diversos subambientes, que quando sujeitos a um tratamento matemático e estatístico adequado, permitem avaliar a circulação no espaço e no tempo do substrato móvel do estuário. Obtiveram-se assim dados granulométricos, densimétricos, morfoscópicos, mineralógicos, teores de matéria orgânica e de carbonatos, dados de foto-interpretação, entre outros. Os métodos laboratoriais usados tiveram em consideração não só os meios disponíveis, como também os objectivos do trabalho. Para a caracterização dos sedimentos seguiu-se a marcha analítica rotineira esquematizada na figura 4. 9.

Separação da Fracção Detrítica da Amostras de Água

As amostras de água colhidas durante as actividades de campo foram sujeitas a um processo de filtragem. A fracção detrítica presente nos frascos de 1l foi separada por intermédio de um sistema de filtragem por vácuo, usando um filtro de 0.45µm de acetato celuloso. Depois de seco, e pesado, foi determinada a concentração de partículas

correspondente ao material retido em cada filtro, e determinadas as percentagens de matéria orgânica e mineral, presente nos resíduos secos dos filtros;

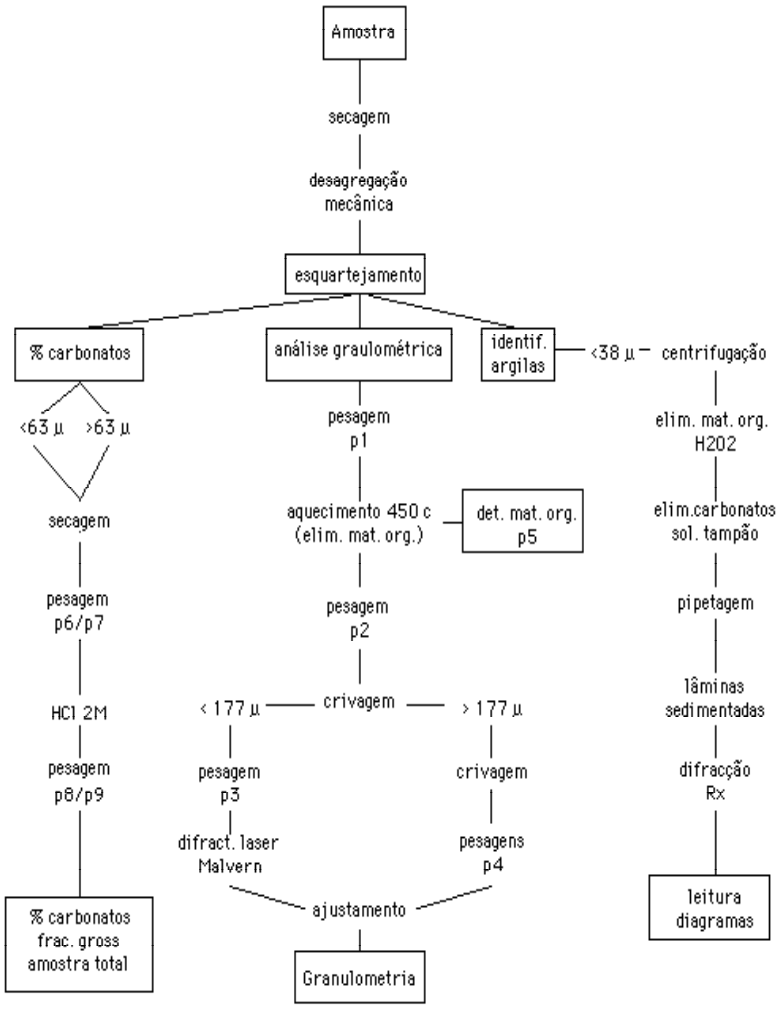


Figura 4. 9. Marcha analítica rotineira para a caracterização petrográfica dos sedimentos. Representação esquemática das etapas laboratoriais seguidas no tratamento dos sedimentos.

Amostras de sedimento

As amostras de sedimento colhidas no campo foram sujeitas a uma série de procedimentos metodológicos, designadamente:

- determinação dos teores em matéria orgânica e carbonatos presentes nos sedimentos. Para a determinação das percentagens em carbonatos presentes nos sedimentos, recorreu-se à técnica por dissolução descrita em Carver (1971), e para teores em matéria orgânica recorreram-se a técnicas por oxidação descritas em Jackson II (1981). Para a remoção da

matéria orgânica presente nos sedimentos recorreu-se à sua oxidação pelo método descrito em Jackson (1958).

- análises granulométricas com recurso a colunas de crivos ASTM para as fracções grosseiras e à técnica de difractometria laser para as fracções silto-argilosas. A primeira metodologia seguiu o procedimento definido por Tucker (1988), enquanto a segunda procedeu-se de acordo com Weber *et al* (1991) recorrendo ao um "Malvern 2600C" da Universidade de Coimbra. Obtidas as distribuições granulométricas finais, estas foram ajustadas e posteriormente determinados os parâmetros estatísticos granulométricos convencionais com recurso ao método gráfico de Folk (1954) e Folk (1957). Preteriu-se o tradicional método da pipetagem fundamentada na Lei de Stokes a favor da difractometria laser por o segundo ser muito mais rápido e traduzir de igual forma a distribuição granulométrica da fracção fina com erros da mesma ordem de grandeza da primeira técnica (Bansch & Deckelnick, 1999);

- a análise composicional da fracção grosseira dos sedimentos fundamentou-se na caracterização mineralógica das fracções 707μm-500μm e 354μm-250μ, recorrendo a uma lupa binocular;

- difracção de Raios X para as fracções finas, com a elaboração de lâminas sedimentadas do material detrítico inferior a 2 micra, e posterior identificação e semi-quantificação do cortejo argiloso das amostras difractadas no Raio-X;

- estudos morfoscópicos da população quartzosa presente nas fracções granulométricas de 707μm-500μm e de 354μm-250μ, de alguns sedimentos representativos de diferentes ambientes de sedimentação;

- separação densimétrica da população pesada de várias fracções granulométricas, e consequente identificação e quantificação;

- determinações da densidade dos sedimentos com recurso a um picnómetro de gás.

4.3 Tratamento Matemático e Estatístico dos Dados

Consistiu num trabalho de tratamento, síntese e interpretação de toda a informação científica obtida, destacando-se as seguintes actividades: a) processamento matemático e estatístico dos dados obtidos nas campanhas de campo e no tratamento laboratorial, e sua projecção gráfica, e interpretação dinâmico-sedimentar; b) processamento e análise de dados referentes aos caudais do rio Mondego, registos maregráficos e da ondulação marinha; c) vectorização de levantamentos cartográficos da zona de estudo, referentes a vários anos; d) elaboração de mapas: com a projecção das áreas supra, sub e intermareais, e com os diferentes ambientes dinâmico-sedimentares.

Parâmetros Geométricos dos Canais

Expostas as propriedades dos escoamentos mais relevantes para neste trabalho, tornou-se da maior importância conhecer alguns dos elementos e parâmetros geométricos utilizados para descrever hidraulicamente os canais de acordo com Lencastre & Franco (1992). A secção molhada do canal (S_m) foi equiparada à secção ocupada pelo escoamento ($S_m=\left(\left(\overline{AD}+\overline{BC}\right)/2\right)\cdot h\right)$ (figura 4. 3). O perímetro molhado (P_m) correspondeu ao perímetro da secção molhada em contacto com a água em movimento, definida para a secção trapezoidal em estudo, por $P_m=\left(\overline{AB}+\overline{BC}+\overline{CD}\right)$. O raio hidráulico ($R_h$) de uma secção do canal estuarino foi determinado pelo quociente entre a secção molhada (ou área da secção transversal ao canal) e o perímetro molhado ($R_h=S_m/P_m$). A largura superficial (L_s) do canal, correspondeu à largura da secção molhada na superfície livre ($L_s=\overline{AD}$). A altura do escoamento (h), equivaleu à distância entre o fundo do canal e a superfície livre. A profundidade média do canal ($\overline{h}$) ao quociente entre a secção molhada e a largura superficial ($\overline{h}=S_m/L_s$) (Lencastre & Franco, 1992). A determinação dos vários parâmetros geométricos nas várias secções no estuário em estudo, foi feita com base nos levantamentos batimétricos

da Junta Autónoma do Porto da Figueira da Foz e na informação maregráfica medida no respectivo local. Sendo a área de cada secção transversal definida apartir da adição das áreas representativas de cada ponto de amostragem, tal que: $S_m = \iint \boldsymbol{d}y.\boldsymbol{d}z$.

Caudais do Mondego no Estuário

Os caudais fluviais no sector estuarino de um rio, comportam-se como onda longa[1] de período superior ao da onda de maré astronómica, com origem no oceano adjacente. A componente horizontal da maré nos diferentes sectores de um estuário pode ser descrita pela diferença ocorrida entre os caudais fluviais (Q_r) e os caudais da maré harmónica (Q_w), de acordo com a expressão: $Q_x = Q_r - Q_{w,x}\cos(\omega t)$, quando as contribuições dos caudais fluviais forem constantes e significativas[2] (van Rijn, 1994). Nesta expressão o segundo termo da subtracção representa a variação dos caudais referentes exclusivamente à acção da maré, cujo valor depende da localização geográfica no estuário ($Q_{w,x}$), com ($\omega = 2\pi/T$) a representar a frequência angular, e (x) a coordenada horizontal, positiva para jusante, e negativa para montante. O referido autor considerou que o caudal médio de cada secção transversal do estuário, em vários ciclos de maré ($\overline{Q}_x$) terá sido equivalente ao caudal fluvial (Q_r), permitindo assim definir vários sectores dinâmicos em função destes parâmetros, tal que: $Q_w >> Q_r$ corresponde ao troço de canal estuarino junto à foz. Quando $Q_w > Q_r$ equivale ao troço do estuário caracterizado por um domínio de escoamentos com direcções opostas (mareais). Para $Q_w < Q_r$ pertence ao troço do estuário caracterizado por um domínio de um escoamento unidireccional e por fim, quando $Q_w = 0 m^3/s$ condiz com a parte já exterior ao estuário, pertencente ao ambiente fluvial. Para condições hidrodinâmicas caracterizadas por caudais fluviais vestígiais, os desfasamentos constatados entre os caudais estuarinos[3] e as respectivas

[1]. Designada neste trabalho por onda fluvial.
[2]. Assumem-se constantes os caudais fluviais uma vez que apresentam um período muito superior ao da onda de maré.
[3]. Ou seja, as PM e as BM não se encontram em fase com as respectivas estofas.

variações da superfície livre, encontram-se segundo van Rijn (1994), fundamentalmente relacionados com a acção do atrito de fundo[4], tornando-se este desfasamento superior e directamente proporcional ao incremento dos caudais fluviais[5]. O mesmo autor também considera que para caudais fluviais baixos, o alcance da maré para montante no estuário é tanto maior, quanto superior for a amplitude da maré, e que para um determinado sector estuarino, o período da enchente diminui com o incremento dos caudais fluviais, sendo compensado por um aumento do tempo de vazante.

Quando não se dispôs de informação maregráfica local que permitisse determinar os caudais fluviais que chegaram ao estuário (Q_r), recorreu-se aos registos limnimétricos, horários convertidos em caudais (expressos em m^3/s) medidos na estação Elevatória do Açude de Ponte de Coimbra ($Q_{r,APC}$). Quanto aos rios afluentes do Mondego situados a jusante desta estação, no Baixo Mondego, embora também se encontrassem monitorizados, os seus registos limnimétricos ainda não estavam disponíveis. Neste contexto, os caudais médios dos diferentes afluentes no Baixo Mondego foram estimados de acordo com a sua contribuição média relativa para os caudais do Mondego, tendo por base os caudais medidos no Açude de Ponte, de acordo com as percentagens definidas por Baptista *et al* (1995). Para determinar o atraso decorrente entre os caudais aferidos no Açude de Ponte em Coimbra e a sua chegada ao estuário, foram considerados os tempos de concentração determinados por Bettencourt (1979).

Formulações, Parâmetros e Considerações

O tratamento de dados maregráficos e sedimentares apresentou um carácter essencialmente semi-empírico, uma vez que se recorreu a um conjunto de formulações referenciadas na literatura da especialidade.

[4]. Com a amplitude da maré a tender diminuir com o aumento do atrito de fundo.
[5]. Esta componente da distorção é designada de distorção fluvial.

a) Velocidade da Corrente e Tensão de Corte

A velocidade média ($\bar{u}$) de cada perfil vertical (efectuado em cada ponto de amostragem no estuário), foi determinada tendo por base o método de integração das várias leituras da velocidade na coluna de água (u_z), ponderadas com base nas distâncias relativas que apresentaram entre si (du/dz), de acordo com o descrito por Kjerve (1979). A determinação da velocidade média em cada perfil também foi estimada recorrendo ao modelo de Yalin (1977), conhecendo o coeficiente de rugosidade (z_o) e a velocidade de corte de fundo (u_*), e considerando que a profundidade da velocidade média de escoamentos turbulentos rugosos correspondem para valores de z/h=0.3927.

$$\bar{u}_{(z)} = \int_0^t u_{(z,t)}\, dt \qquad (4.\ 1)$$

Quando se dispôs de vários perfis de velocidade numa secção transversal, recorreu-se ao método descrito por Kjerfve & Seim (1984), que permitiu determinar a velocidade média de cada subárea representada por cada um dos três perfis de velocidade (figura 4. 3). A determinação da velocidade média na secção transversal do canal ($<\bar{u}>$) teve em consideração a ponderação das velocidades médias determinadas para cada subárea, tendo por base a dimensão de cada uma destas subáreas na secção transversal total.

$$<\bar{u}> = \frac{1}{S_m} \iint_{S_m} \bar{u} \cdot dS_m \qquad (4.\ 2)$$

Quando apenas se dispôs de apenas um perfil de velocidades na secção transversal (na parte central do canal), recorreu-se a uma expressão de cálculo da velocidade média $<\bar{u}>$ deduzida apartir do modelo Manning (1889 *in* Dyer, 1986). Este, considerou o atrito constante ao longo da secção transversal do canal, o que permitiu considerar que a variação no gradiente de energia (ΔE) ao longo desta secção tenha sido desprezada (eq.4. 3). Nesta expressão, $\bar{u}$ representou a velocidade média do perfil vertical observado, R_h o raio hidráulico da secção, e h a altura da coluna de água no respectivo perfil.

$$\frac{<\bar{u}>}{\bar{u}} = \frac{R_h^{2/3}}{h^{2/3}} \qquad (4.\ 3)$$

A definição das várias subsecções transversais (S_m) de cada estação do estuário, teve-se em consideração não só a altura da coluna de água medida em cada um dos três perfis, mas também a variação transversal da batimetria obtida apartir dos levantamentos cartográficos que serviram de base a este trabalho. Usando este procedimento, as velocidades médias na secção foram calculadas (para os intervalos irregulares ao longo do ciclo de maré), ajustando o raio hidráulico em função da variação da superfície livre da maré. Os caudais das fases de enchente e de vazante foram integrados separadamente.

Para estimar a velocidade da corrente ao longo da coluna de água (u_z), recorreu-se à equação universal da velocidade de von Karman-Prandtl (eq. 4. 4), com κ=0.4.

$$u_z=(u_*/\kappa)Ln(z/z_o) \qquad (4.\ 4)$$

A determinação da velocidade de corte (u_*) para cada perfil de velocidades, teve em consideração as três leituras mais próximas do fundo, aplicando o método gráfico definido em Open University Course Team (1989) ou em Middleton & Southard (1984). Este procedimento também permitiu determinar para cada perfil de velocidade, o Coeficiente de rugosidade (z_o) que não tendo significado físico, determina a altura (z_o) onde a velocidade da corrente se anula. Segundo Wiberg & Smith (1987) permite estimar a rugosidade de fundo para escoamentos turbulentos rugosos, considerando $k_n=30z_o$. A respectiva tensão de corte de fundo foi determinada de acordo com a expressão 4. 5. Igual procedimento, foi considerado para o cálculo da tensão de corte média para cada subárea da secção transversal ($\bar{\tau}_o$), e para o cálculo da tensão de corte média para toda a secção do canal $<\bar{\tau}_o>$, considerou-se a lei da Tensão Quadrática, que relaciona a tensão de corte de fundo com o produto entre a massa específica do fluido (r), pela velocidade da corrente medida à altura de referência (z) na camada limite, pelo coeficiente de tracção (C_d) (equação 4. 5).

$$\tau_o=\rho\cdot(u_*)^2 \qquad \text{ou} \qquad \bar{\tau}_o=\rho\cdot C_d\cdot(u_z)^2 \qquad (4.\ 5)$$

A raiz quadrática média da velocidade (u_{rms}) correspondeu a um parâmetro determinado em função da velocidade $u_{(x,t)}$ determinado pelo valor positivo da raiz quadrada da média[6] do quadrado da velocidade, de acordo com a expressão 4. 6 (Unesco, 1992).

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \overline{u}_{x,t}^2 \cdot dt} \qquad (4.\ 6)$$

b) Caudais e Volumes

O cálculo dos volumes de enchente ($V_{e,x}$) e de vazante ($V_{v,x}$), que entraram e saíram por uma determinada secção recta do estuário em ciclo de maré, foi de acordo com as seguintes expressões.

$$V_{e,x} = \int_{t_f} Q_{f,x}dt \qquad \text{e} \qquad V_{v,x} = \int_{t_v} Q_{v,x}dt = Q_{v,x} \cdot t_v \qquad (4.\ 7)$$

Com o volume total (V_x) em cada secção transversal analisada:

$$V_x = V_{e,x} + V_{v,x} = \int_t |Q|dt \qquad (4.\ 8)$$

ou ainda o volume resultante, ou seja, o volume fluvial ($V_{r,x}$):

$$V_{v,x} - V_{e,x} \approx V_{r,x} \qquad (4.\ 9)$$

Para a determinação da velocidade média da massa de água fluvial, superficial, que se movimentou sempre no sentido de vazante, recorreu-se à seguinte relação.

$$\overline{u}_{r(x,t)} = Q_{r,t}/S_{m,x} \qquad (4.\ 10)$$

enquanto o volume de água fluvial (R ou V_r) descarregado no estuário durante um ciclo de maré (T≈12.42h) foi estimado de acordo com Miranda (2002), por:

$$R = V_r = Q_r \cdot T = S_{m,x} \cdot \overline{u}_r \cdot T \qquad (4.\ 11)$$

Com, $S_{m,y}$ ter representado a área média da secção transversal, $\overline{u}_r$ a velocidade média dos caudais fluviais, $Q_{r,t}$ o caudal fluvial médio em cada ciclo de maré e T o período do ciclo de maré. De acordo com Unesco (1992) a velocidade gerada pelos caudais fluviais também pode ser estimada por $\overline{u}_r = Q_r/S_m \approx \overline{u}_s$ pela velocidade média de superfície.

O cálculo dos caudais (Q) em circulação nas quatro estações do estuário, também foram determinados tendo por base a definição: $\overline{Q} = \overline{u} \cdot S_m$, ou ainda para a secção transversal: $<\overline{Q}> = <\overline{u}> \cdot <S_m>$ e a metodologia de Kjerfve & Seim (1984).

[6]. durante um ou mais ciclos completos de maré de período T.

$$\bar{Q} = \bar{u} \cdot S_m \qquad (4.\ 12)$$

O prisma de maré (**P**) foi definido pelo volume de água do mar (V_f) que entrou no estuário durante a fase enchente e foi estimado pela expressão 4. 13, considerando T_f o período da fase de enchente, η_w a altura da maré, A_s a área superficial do estuário, A a área da secção transversal na doca do estuário, a_{uw} a amplitude da velocidade no ciclo de maré e T o período do ciclo de maré.

$$\mathbf{P} = V_e = \int_0^{T_e} Q_e \cdot dt = \eta_w \cdot A_s \qquad (4.\ 13)$$

c) Densidade e Viscosidade

A determinação da massa específica da água (ρ) foi feita com base apenas em função das leituras da temperatura e salinidade medidas *in situ*, considerando uma pressão constante de uma atmosfera (Kjerfve, 1979). O facto de se ter omitido a componente da pressão para a determinação da densidade, deveu-se ao facto de se estar a estudar e comparar massas de água localizadas praticamente à mesma profundidade, a pressões muito semelhantes à atmosférica, uma vez terem estado localizadas a batimetrias médias muito pouco profundas, da ordem dos 3m. Por terem correspondido a águas superficiais não foram necessárias correcções adiabáticas da pressão dado que os valores de sigma-t terão sido iguais à densidade potencial ($\sigma_t=\sigma_\phi$) uma vez que a temperatura dos fluidos *in situ* e a temperatura potencial calculada terão sido iguais, conferindo estabilidade (Howe & Tait, 1965; Pond & Pichard, 1983).

A determinação da densidade (ρ) dos diferentes tipos de massas de água do estuário do Mondego teve por base as leituras locais de temperatura e de salinidade de acordo com o algoritmo matemático[7] proposto em Unesco (1991), permitindo também a determinação da massa específica, de sigma-t ($\sigma_t=\rho$-1000), do volume específico ($\alpha=1/\rho$) e da densidade relativa ($d=\rho/\rho_{ap}$, com ρ_{ap}=999.95). No âmbito deste trabalho recorre-se frequentemente a uma

[7]. Programa SIGMAT em Fortran 77 baseado na equação algoritmo definido em JPOTS (1981), elaborado por Fofonoff & Millard (1983), e adaptado para as séries de dados do estuário do Mondego.

abreviação dos valores da densidade, expressando-a sob a forma do parâmetro Sigma-t (σ_t), tal que $\sigma_{T,S,P} \approx \sigma_{T,S} = \sigma_t = (\rho - 1000)$, embora por vezes também se tenha considerado a densidade relativa definida por $d = (\rho/\rho_{ap})$, com $\rho_{ap} = 999.95$ a simbolizar a massa específica da água pura à temperatura de 4ºC.

A viscosidade cinemática (ν) das diferentes massas de água, por definição correspondeu ao quociente entre a viscosidade molecular (μ) pela massa específica do fluido, exprimindo-se no SI em $m^2 s^{-1}$.

$$\nu = \mu/\rho \qquad (4.\ 14)$$

Diagramas TS

Em determinadas zonas do estuário em contacto com a atmosfera podem ter ocorrido perdas e ganhos de calor, de sal, ou de água doce, causadas pela irradiação solar, pela chuva, e ou por outras influências externas, capazes de condicionar a densidade dos escoamentos e eventualmente comprometer a interpretação de diagramas T-S (Miranda *et al*, 2002). Contudo, e uma vez que os quadros hidrodinâmicos estudados decorreram sob condições meteorológicas consideradas amenas, definidas pela ausência e/ou por fracos episódios de pluviosidade, reflectindo condições de pressão atmosférica compreendidas entre os 1020 e os 1030mbar, e não abrangeram quadros de temporal ou de intempérie, nem de cheia, estas condições meteorológicas levaram a considerar que as variações da temperatura e a salinidade registadas relacionaram-se fundamentalmente com os processos de mistura ocorridos entre as massas de água marinha e fluvial, comportando-se como propriedades conservativas. Apenas na estação da Gala foi registado um decréscimo da densidade da massa de água de mistura, causado por um aumento relativo da temperatura ocorrido durante o ciclo de maré G110893. Desta forma, os diagramas T-S elaborados apartir das variações da temperatura e salinidade integradas na coluna de água, registadas nos restantes ciclos de maré aferidos em diferentes sectores neste sistema costeiro e espaçados no tempo, permitiram identificar a origem das

diferentes massas de água e seguir o seu trajecto no estuário. Possibilitaram igualmente determinar a amplitude da mistura ocorrida entre as massas de água e fazer previsões da mesma, de acordo com o descrito em Open University Course Team (1989). Segundo este autor, para quantificar a mistura ocorrida e determinar a proporção relativa da mistura ocorrida entre os 2 tipos de água, para as diferentes fases dos vários ciclos de maré em análise, determinaram-se as distâncias relativas segundo as linhas rectas que unem as duas massas de água. Uma vez que as massa de água marinha e fluvial foram definidas por uma variabilidade sazonal de temperatura e salinidade, os segmentos de recta definidos, uniram os respectivos pontos lidos no diagrama TS. Usou-se o termo "massa de água" em detrimento de "tipo de água" para descrever a água marinha, a fluvial e a de mistura, por estas terem sido representadas por um leque restrito de temperaturas e salinidades e não por um único valor.

d) Mistura e Estratificação

Para definir o grau de mistura e simultaneamente o grau da estratificação, recorreu-se ao parâmetro de estratificação (n_S) que descreveu não só o gradiente vertical da salinidade como o da densidade de acordo com a expressão 4. 15, em que $\Delta S=S_b-S_s$ simbolizou a diferença registada entre as salinidades aferidas junto ao fundo (S_b) e à superfície da água (S_s), e $\overline{S}=\int_z^h S\cdot dz$ a salinidade média no escoamento também estimada por $\overline{S}\approx 0.5(S_b+S_s)$ na ausência de várias leituras na coluna de água. No quadro 4. 3 encontram-se expressos os limites para o grau de mistura e de estratificação definidos por Hansen & Rattray (1966 *in* Unesco, 1992).

$$n_S=\Delta S/\overline{S} \qquad (4.\ 15)$$

Para quantificar a capacidade de produção de turbulência recorreu-se ao número de Richardson (R_i) que relaciona o módulo dos gradientes vertical de densidade ($\partial\rho/\partial z$) com o da velocidade ($\partial u/\partial z$), simbolizando respectivamente uma relação entre as forças estabilizadoras do gradiente e a produção de turbulência no sistema, de acordo com van Rijn (1994).

Corresponde a um número adimensional, que depende da orientação do eixo O_z que se dirige positivamente no sentido oposto à aceleração da gravidade, e que é definindo em função da densidade (ρ) da água estuarina. Segundo Unesco (1992) e Miranda *et al* (2002) pode ser deduzido apartir da equação linear do estado da água do mar ($\rho=\rho_o(1+\beta S)$) e consequentemente ser expresso apartir da salinidade (equação 4. 16), com $\beta=7x10^{-4}$ e a α representar o coeficiente médio de concentração salina. Trabalhos experimentais revelaram que para escoamentos uniformes, os regimes deixam de ser turbulentos para valores de $R_i \approx 0.25$ passando a apresentar características laminares, enquanto para $R_i<0.25$ as condições de turbulência sobrepõem-se à estratificação de densidade gerando mistura vertical, e para $R_i>0.25$ define uma estratificação estável, associada a um maior gradiente de salinidade (quadro 4. 3).

$$R_i = -(g(\partial\rho/\partial z))/(\rho(\partial u/\partial z)^2) \approx -(g\beta(\partial u/\partial z)/(\partial u/\partial z)^2) \qquad (4.\ 16)$$

O número de Richardson estuarino (R_{iE}) proposto por Fisher (1972, *in* Unesco, 1992) define o quociente entre o ganho de energia potencial associado aos caudais fluviais (quantificado por $gQ_r\Delta\rho$) com a capacidade de mistura das correntes de maré. Também define o efeito que a descarga fluvial apresenta na estratificação horizontal da densidade (representado por $\Delta\rho_H/\bar{\rho}$), razão pela qual é frequentemente usado como indicador de estabilidade em fluidos com estratificação de densidade. Para um determinado local do estuário pode ser expresso sob a forma (*vidé* equação 4. 17) , em que b corresponde à largura do canal, Q_r os caudais fluviais, $\Delta\rho_H=\rho_{ZC}-\rho_{ZF}$ a diferença horizontal da densidade na zona de mistura (ZM), $\bar{\rho}$ o valor médio da densidade para o ciclo de maré. Este parâmetro determina para valores elevados de R_{iE} com uma estratificação alta da densidade e consequentemente uma dinâmica do estuário dominada pelos regimes fluviais, enquanto valores baixos de R_{iE} com uma pequena estratificação vertical e com um regime dinâmico forçado pela maré (quadro 4. 3).

$$Ri_E = (gQ_r(\Delta\rho_H / \overline{\rho}))/((b(u_{rms})^3) \quad (4.17)$$

Para quantificar a competição ocorrida entre os regimes fluviais e a maré, recorreu-se à relação ocorrida entre os volumes fluviais (R) descarregados no estuário durante um ciclo de maré e o correspondente prisma de maré (P). Este quociente, também designado de razão de fluxo, encontra-se representado pela equação 4. 18, de acordo com Simmons, 1955 *in* Dyer (1997).

$$R/P \quad (4.18)$$

Para quantificar a turbulência, recorreu-se ao o número de Reynolds (R_e) que corresponde a um parâmetro físico adimensional e permite descrever o tipo de regime em função da razão entre o produto da velocidade ($\overline{u}$) pela profundidade média ($\overline{h}$), com a viscosidade cinemática (υ), de acordo com a expressão 4. 19. Define regimes laminares para $R_e<2000$ e para $R_e>10^5$ regimes completamente turbulentos. Junto ao fundo, as condições de turbulência foram quantificadas recorrendo ao número de Reynolds de fronteira (R_{e*}), (equação 4. 20). Permitiu definir se o escoamento é suave turbulento para valores de $R_{e*}<5$, se é turbulento rugoso para $R_{e*}>70$, ou se é escoamento turbulento de transição para $5<R_{e*}<70$ (Yalin, 1977; Soulsby, 1997; Dyer, 1986 e van Rijn, 1989).

$$R_e = \overline{u} \cdot \overline{h} / \upsilon \quad (4.19)$$

$$R_{e*} = u_* \cdot k_n / \upsilon \quad (4.20)$$

Quadro 4. 3. Tipos de mistura e de estratificação considerados para o estuário do Mondego. Adaptado e modificado de Unesco (1992).

Tipos	Tipo de mistura entre as massas de água	Estratificação da densidade na coluna de água	Caudais fluviais	Ampli-tude da maré	R/P Dyer (1997)	R_i	R_{iE}	n_S Unesco (1992), Dyer (1997)
I	cunha salina	estratificado	elevados	pequena	>1	>0.25	>0.8	>1
II	parcialmente misturado	estratificação moderada	médios	média	≈0.25	≤0.25	0.08< <0.8	0.15< <1
III	bem misturado	estratificação muito pequena	pequenos	elevada	<0.1		<0.08	<0.15

e) Gradiente longitudinal de pressão

O gradiente longitudinal de pressão gerado no interior do estuário, de acordo com van Rijn (1994) pode ser representado pela expressão 4. 21, que relaciona o efeito barotrópico que é responsável por movimentos estuário acima durante a enchente (com $\partial\eta/\partial x>0$m/km) e

estuário abaixo durante a vazante (com $\partial\eta/\partial x<0$m/km), com o efeito baroclínico ($\partial S/\partial x>0$‰/km) que tende a gerar permanentemente movimentos da massa de água salina para o interior do estuário. Contudo, aquele gradiente pode ser expresso em função da salinidade dado que o efeito desta predomina sobre as demais propriedades[8] na variação da densidade num estuário. Para tal, Pitchard, 1971 *in* Miranda *et al* (2002) propõe a expressão 4. 21, para estimar a componente longitudinal da força de gradiente de pressão longitudinal por unidade de massa, expressa em N/m^{-2} e considerando a pressão atmosférica constante nesse sistema. Em que, β representa o coeficiente de concentração salina médio $\beta=(1/\rho_o)(\partial\rho/\partial S)\approx 7x10^{-4}(‰^{-1})$, e as variáveis p, g, ρ, ρ_η representam a pressão, o módulo da aceleração da gravidade, a densidade, e a densidade na variação da superfície livre, e os eixos de coordenadas Oz e Ox encontram-se de acordo com a orientação cartesiana adoptada para o estuário, com a origem localizada na cabeça, no açude da Ponte de Formoselha.

$$(\partial p/\partial x) = g\rho_\eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + g\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x}\cdot dz \text{ ou } -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} - g\beta\int_z^\eta \frac{\partial s}{\partial x}\cdot dz \qquad (4.\ 21)$$

f) Tempos de Residência

Para calcular o Tempo de residência (T_r) também se recorreu ao modelo proposto por Sanford *et al* (1992) e exposto em Chi-Fang *et al* (2004). Este comparou a energia da onda de maré (por intermédio da amplitude da constituinte M_2 da velocidade) e do prisma de maré, com as descargas fluviais em cada ciclo de maré. Este modelo considerou também a influência do coeficiente de retorno (b) ("return flow factor) definido por Sanford *et al* (1992) e que Moore *et al* (2006) determinou pela relação entre a amplitude da componente horizontal (u_{M2}) e as velocidades médias da fases da vazante ($\overline{u}_v$) e da enchente ($\overline{u}_e$), tal que, $b=(u_{M2}-\overline{u}_v)/(u_{M2}+\overline{u}_e)$.

[8]. Nomeadamente da temperatura, da concentração de partículas em suspensão e da pressão atmosférica.

g) Formulações do Transporte Sedimentar de Fundo

No âmbito deste trabalho, foram apenas determinadas as taxas de transporte sedimentar de fundo, que se entenderam ter correspondido ao movimento das partículas que se deslocam junto ao fundo por rolamento, arrastamento e saltação (Allen, 1992). As medições do transporte sedimentar de fundo, por metro linear, efectuadas apartir dos dois amostradores do tipo "van trap" e "BTAM", foram quantificados recorrendo à expressão, 4. 22, em que P_a representou o peso de sedimento recolhido e t_a o tempo de exposição da armadilha.

$$q_{sb}= ((P_a/(\rho d_s))/t_a)/0.15 \quad \text{ou} \quad q_{sb}= ((P_a/(\rho d_s))/t_a)/0.20 \qquad (4.\ 22)$$

Nas situações em que se efectuaram mais que uma medição do transporte sedimentar de fundo para um determinado ponto de amostragem, considerou-se representativo o valor médio de todos q_{sb}.

Determinados os caudais sólidos em cada um dos três pontos de amostragem, que compuseram um ciclo de maré, estes foram linearmente interpolados ao longo do tempo (em cada um dos pontos de amostragem). Seguidamente foi determinado o caudal sólido de fundo (por metro linear) da secção transversal, tendo por base a média dos valores de q_{sb} nos três pontos de amostragem, ao longo do ciclo de maré. Seguiu-se a fraccionação dos caudal sólidos de enchente e de vazante, e a determinação do caudal sólido de fundo residual, por ciclo de maré.

Análise Harmónica

Com a finalidade de estudar a propagação da maré e a circulação das principais correntes associadas, nos diferentes sectores do estuário, recorreu-se à aplicação da análise harmónica às séries de dados hidrográficos recolhidas durante as actividades de campo. Foi assim possível determinar as amplitudes e fases das constituintes semidiurna e tetradiurna

principais[9] da maré, e consequentemente estimar os períodos de enchente e de vazante, as estofas das baixa-mares e das preia-mares, calcular as velocidades médias máximas de enchente e vazante de cada ciclo, a amplitude da maré, e calcular parâmetros que descreveram a magnitude e o tipo de distorção sofrida pela maré. O conhecimento das variações destes parâmetros, quer ao longo dos canais principais, quer no tempo, permitiram caracterizar hidrodinamicamente o estuário. A relação ocorrida entre as amplitudes e fases das duas constituintes da maré analisadas, permitiu definir os efeitos não lineares associados à propagação e consequente dissipação de energia da maré[10], que se traduziram na assimetria desta onda, bem como, a componente da velocidade descreveu a tendência evolutiva do estuário segundo um ponto de vista morfológico. Este estudo também foi complementado com a análise de alguma da informação maregráfica disponível, recorrendo às constituintes harmónicas determinadas por Baptista (1990) e Baptista *et al* (1995) que se fundamentaram em registos maregráficos longos, com um período aproximado a um ano, e referentes apenas à variação da superfície livre em diferentes estações do estuário. Estas foram praticamente contemporâneas aos trabalhos de campo desenvolvidos neste trabalho.

i) Metodologia

A análise harmónica baseou-se no método dos mínimos quadrados proposto por Godin, 1972 *in* Foreman & Henry (1989) a fim de obter o melhor ajuste entre os valores obtidos pela análise harmónica e os dados oceanográficos de campo, e uma vez que as leituras da velocidade e das alturas da coluna de água apresentaram-se irregularmente espaçadas no tempo[11], os dados de campo foram interpoladas linearmente afim de minimizar a variabilidade. Uma das grandes vantagem da aplicação deste método da análise harmónica consistiu na possibilidade de escolha do número e tipo das constituintes harmónicas a

[9]. M_2 e constituinte de ambientes pouco profundos M_4 gerada pelo atrito de fundo e pela acção da fisiografia.
[10]. Resultante da acção, quer do atrito no fundo nos canais, quer dos vários elementos fisiográficos do estuário.
[11]. Com intervalos de tempo irregulares entre cada leitura, apresentando cada série pequenos "gaps".

calcular, antes de iniciar o processo de ajuste. Aos desvios ocorridos entre os dados maregráficos de campo e os linearmente interpolados pela curva harmónica, corresponderam aos valores residuais, ou seja, ao erro cometido pela análise (Li, 2000; Fortunato *et al*, 1999). O software de cálculo utilizado para o cálculo das amplitudes e fases das constituintes harmónicas foi desenvolvido em Matlab pelo Professor Jackson O. Blanton[12], tendo depois sido adaptado pelo doutorando para o estuário do Mondego e para o calculo dos parâmetros maregráficos, hidrodinâmicos e relativos ao transporte sedimentar.

A análise espectral de séries de Fourier foi preterida por não permitir escolher previamente as constituintes harmónicas, bem como requer sequência de dados contínua e uniforme (regularmente espaçados no tempo e sem lapsos de registo). Já a técnica de análise harmónica das séries temporais, com recurso à regressão sinusoidal pelos mínimos quadrados, por não requerer dados regularmente espaçados no tempo, pode ser aplicado às diferentes séries temporais muito curtas (1 ciclo de maré) obtidas em cada estação do estuário, permitindo igualmente a escolha antecipada das componentes harmónicas a analisar (Foreman & Henry (1989).

ii) ***Datuns***

O tempo aferido durante os trabalhos de campo para os diferentes ciclos de maré correspondeu ao fuso 1 UTC[13]. Contudo, para a aplicação da análise harmónica, este foi convertido em duas escalas temporais com *datuns* distintos. Primeiramente foi recalculada a escala para um tempo de referência comum e anterior a todos os ciclos de maré aferidos no estuário, que correspondeu às zero horas do dia 6 de Dezembro de 1991. O segundo procedimento consistiu em reconverter a hora de cada ciclo de maré, para um tempo de referência, que coincidiu com a preia-mar imediatamente precedente, e estimada pelo Instituto

[12] University of Georgia, Skidaway Institute of Oceanography, USA.
[13]. Decreto-lei nº124/92 de 2 de Julho.

hidrográfico para o porto da Figueira da Foz[14]. Uma vez que as fases obtidas com o primeiro *datum* inviabilizavam a sua comparação (das fases obtidas para as constituintes M_2 e M_4) em cada estação, bem como, entre as quatro estações, pretendeu-se apenas comparar os resultados obtidos apenas sob a forma de uma relação de fases expressa pelo parâmetro $2M_2$-M_4 para os dois *datuns*, afim no caso de coincidência de valores, confirmar e validar os resultados obtidos com o *datum* relativo à PM. Por se ter constatado coincidência de resultados entre ambos os métodos quando analisada a relação entre fases ($2M_2$-M_4), optou-se por usar o correspondente à PM tabelada pelo IH, imediatamente precedente ao início da leitura de cada série de dados. Desta forma, para cada ciclo de maré medido nas diferentes estações do estuário[15], foi aplicada a análise harmónica relativamente a estes dois *datuns*, quer para a variação da superfície livre, quer para a componente horizontal da maré. As séries de dados da variação da superfície livre obtidas nas 4 estações do estuário (Emb, Gala, 5I e EE) foram definidas apartir das alturas da coluna de água medidas apartir do fundo dos canais (e não relativamente ao zero hidrográfico), sendo depois reconvertidas para distâncias relativas ao nível médio da águas do estuário (NMM=+2mZH). As séries das velocidades Eulerianas foram representadas por magnitudes positivas para as velocidades segundo o sentido de vazante e magnitudes negativas segundo o sentido da enchente.

A aplicação da análise harmónica à componente horizontal da maré, fez-se para as leituras de velocidade feitas junto ao fundo (velocidade de fundo), para as leituras de velocidade junto à superfície (velocidade de superfície) e para as velocidades integradas na coluna de água de cada perfil (também designadas de velocidades médias). Os resultados obtidos com as velocidades médias[16] permitiram definir as fases de enchente e de vazante para

[14]. Os valores horários constantes nas tabelas do porto da Figueira da Foz foram corrigidos para hora oficial portuguesa.
[15]. Estações da embocadura, Gala, Cinco Irmão e Estação Elevatória.
[16]. ou integradas na coluna de água.

os diferentes ciclos de maré, identificar as respectivas estofas, bem como, avaliar as velocidades máximas das diferentes fases.

iii) Parâmetros da Maré

A onda de maré pode ser descrita por vários parâmetros, designadamente pela altura da onda de maré (A_w) correspondente à diferença entre o nível máximo (PM) e mínimo (BM) da onda, enquanto a amplitude foi definida por $a_w=A_w/2$. O comprimento de onda (λ_w) correspondeu à distancia medida entre duas cristas consecutivas. O tempo que demorou a percorrer este percurso, representou o período que foi semidiurno (T_w=12.42h).

iv) Erros Cometidos Pela Análise Harmónica

O estudo da propagação não linear da maré restringiu-se somente à componente harmónica não linear M_4, preterindo os restantes super-harmónicos M_6, … para os quais uma pequena parte da energia da onda de maré terá sido transferida, minimizando assim, os erros residuais cometidos pela análise, de acordo com Foreman & Henry (1989). Acresceu o facto de as séries de dados em que se fundamentou, apresentarem um período muito curto de apenas um ciclo de maré, e com valores irregularmente espaçados no tempo. Os erros cometidos pela análise foram definidos pelo erro residual ou erro total (Rss) obtido pelo método dos mínimos quadrados, e complementado pelo desvio padrão resultante do ajuste (*s*), e pela variabilidade explicada pelo ajustamento traduzida pelo coeficiente de determinação (R^2), de acordo com Li (2000). Foi também determinado o erro quadrático médio (RMS), de acordo com Fortunato *et al* (1999). Consideraram-se válidas as análises cujos resultados inerentes à superfície livre foram definidos por erros totais inferiores a Rss<0.40m ou a RMS<0.1m e para a velocidade, inferiores a Rss<0.30m/s e a RMS<0.1m/s.

Afim de minimizar os erros cometidos, não se consideraram válidos os resultados maregráficos obtidos apartir de análise harmónicas que definiram erros de Rss superiores aos considerados válidos, ou então, obtidos apartir de séries de dados maregráficos com um

número considerado reduzido de elementos[17]. Desta forma tentou-se salvaguardar as séries de dados maregráficas definidas por uma disposição muito irregular dos diferentes parâmetros maregráficos (ao longo do ciclo da maré) e consequentemente não abranger as fases mais relevantes e se considerar que não permitem uma interpolação e um bom ajuste entre os dados locais e os correspondentes à curva harmónica.

Os resultados obtidos com a aplicação da análise harmónica às series de dados referentes à variação da superfície livre nos três perfis que compuseram cada estação, apresentaram por vezes algumas limitações, relacionadas fundamentalmente com dificuldades em fixar a embarcação em cada ponto de amostragem ao longo de todo o ciclo de maré. Destas, resultaram ocasionalmente leituras que apresentaram um desvio considerável relativamente ao ponto de amostragem inicial, não tendo estas sido consideradas para a análise harmónica. Também não se consideraram eventuais gradientes transversais aos canais ocorridos na superfície livre, definidos entre os três pontos de amostragem de cada estação, face à precisão instrumental na leitura da altura da coluna de água, que foi de 0.10m.

v) Distorção da Maré

Para a caracterização da distorção sofrida pela propagação da onda de maré no estuário, recorreu-se ao modelo descrito em Dyer (1997), fundamentado na diferença de fases medida em graus entre as duas componentes da maré. Considerou-se que quando as variações da superfície livre ($\eta_{x,t}$) e da velocidade ($u_{x,t}$) se encontram em fase, definem uma distorção de Ø=0° para uma onda de gravidade estacionária, enquanto para Ø=90° descreveu a propagação de uma onda progressiva, cuja dissipação de energia se encontrou fundamentalmente relacionada com a acção do atrito de fundo. Para valores compreendidos entre os 0°<Ø<90° este modelo determinou um carácter misto estacionário+progressivo.

[17]. Tendo-se estipulado um número mínimo de 8 leituras distribuídas ao longo de cada ciclo de maré, para se aplicar a análise harmónica.

Previsões Maregráficas

Muito embora a estação da Embocadura e o local onde foi colocado a bóia ondógrafo do Instituto Hidrográfico (IH) tenham estado geograficamente muito perto, as fases das constituintes harmónicas da componente vertical da maré obtidas em ambos os locais, por métodos distintos, foram apenas sujeitas a uma análise qualitativa, uma vez que divergiram quanto à definição de *datuns* marianos. Porém, quando comparadas as amplitudes destas constituintes harmónicas referentes aos ciclos de maré realizados na estação da Embocadura com as fornecidas pelo IH, foi possível constatar que os desvios registados entre elas foram pouco significativos, mas reflectiram o facto de uma vez que as campanhas de campo não terem decorrido sob condições meteorológicas adversas ou extremas, ou sob regimes de cheia ou de temporal, minimizando assim eventuais desvios maregráficos entre os dados previstos e os de reais.

Tendo por base apenas os resultados maregráficos obtidos nas quatro estações em análise, não foram feitas quaisquer previsões maregráficas para o estuário, uma vez que as constituintes harmónicas calculadas foram fundamentadas em registos maregráficos muito curtos, espaçadas no tempo, e com um número reduzido de leituras para se proceder a previsões. também acresceu o facto de não ter sido possível abranger uma maior diversidade de condições hidrodinâmicas locais, nomeadamente registar ciclos de maré sob regimes fluviais muito elevados. Van Rijn (1994) define um período mínimo de um mês, e um período óptimo de um ano, para um tempo de registo contínuo destes dados, para que uma previsão maregráfica num sistema estuarino tenha credibilidade.

Classificação da Maré Astronómica e Parâmetros Associados

A classificação da maré num sistema estuarino pode ser feita com recurso à análise das quatro principais componentes diurnas e semidiurnas astronómicas de acordo com a sua importância relativa, dado que estas explicam cerca de 83% da amplitude da maré, quando

expressas segundo o parâmetro de forma da maré (P_f), de acordo com van Rijn (1994). Este autor considera para valores de $P_f \leq 0.25$ que a maré apresenta um comportamento semidiurno com duas preia-mares e duas baixa-mares, com amplitudes muito idênticas em cada dia. Para valores de $P_f > 3$ a maré comporta-se como diurna, enquanto para valores $0.25 < P_f < 1.5$ esta apresenta um comportamento do tipo misto com predomínio da maré semidiurna[18], enquanto para $1.5 < P_f < 3$ a maré é do tipo misto mas com predomínio da maré diurna.

$$P_f = (k_1+O_1)/(M_2+S_2) \qquad (4.\ 23)$$

Para a definição dos patamares médios mais relevantes da variação da superfície livre no interior do estuário do Mondego, recorreu-se às expressões do quadro 4. 4 definidas em van Rijn (1994), tendo por base as amplitudes das constituintes M_2, S_2, K_1 e O_1 da componente vertical da onda de maré, as quais foram aplicadas às amplitudes das constituintes harmónicas determinadas por Baptista (1990) e também publicadas em Baptista *et al* (1995).

Quadro 4. 4. Elementos e parâmetros da maré determinados pelas expressões definidas em van Rijn (1994), que entra em consideração com as amplitudes das constituintes M_2, S_2, K_1 e O_1. Nas formulas, $h_o \approx +2mZH$ e representou o nível médio da variação da superfície livre.

Elementos e parâmetros da maré:	Formulações:
Preia-mar média das marés vivas	$PMMMV \approx h_0 + \left(N_{M_2} + N_{S_2}\right)$
Baixa-mar média das marés vivas	$BMMMV \approx h_0 - \left(N_{M_2} + N_{S_2}\right)$
Preia-mar média das marés mortas	$PMMMM \approx h_0 + \left(N_{M_2} - N_{S_2}\right)$
Baixa-mar média das marés mortas	$BMMMM \approx h_0 - \left(N_{M_2} - N_{S_2}\right)$
Preia-mar máxima das marés vivas	$PMMax \approx h_0 + \left(N_{M_2} + N_{S_2}\right) + \left(N_{K_1} + N_{O_1}\right)$
Baixa-mar mínima das marés vivas	$BMMin \approx h_0 - \left(N_{M_2} + N_{S_2}\right) - \left(N_{K_1} + N_{O_1}\right)$
Amplitude média das marés vivas	$AMMV = PMMMV - BMMMV \approx 2\left(N_{M_2} + N_{S_2}\right)$
Amplitude média das marés mortas	$AMMM = PMMMM - BMMMM \approx 2\left(N_{M_2} - N_{S_2}\right)$
Amplitude média da maré	$AMM \approx 2N_{M_2}$
Diferença máxima diária da maré	$DMM = PMMax - PMMMV \approx N_{K_1} + N_{O_1}$

[18]. Apresentam um predomínio da maré semidiurna com duas preia-mares e duas baixa-mares por dia, com amplitudes e tempos muito distintos entre si.

O nível médio da maré foi estimado para todas as estações em estudo recorrendo às expressões: NMM=(AMMV/2)+BMMMV e NMM=(AMM/2)+BMMMM, tendo-se obtido um valor de +2mZH, quer para as marés vivas, mortas e máximas, quer para todas as estações do estuário do Mondego e a localizada imediatamente ao largo do molhe norte da embocadura (estação 6). Os NMM também permitiram diferenciar as marés mortas das marés vivas no estuário. A coincidência do valor do NMM para as diferentes estações estuarinas reforçou a precisão destes dados maregráficos, estando este resultado associado às reduzidas dimensões deste estuário.

Funções Matemáticas/correlações

Para o tratamento estatístico dos dados hidrodinâmicos recorreu-se à análise de regressão linear simples e múltipla, que verificaram os pressupostos definidos por Draper & Smith (1998): a) os erros apresentaram um valor médio nulo e uma variância constante para todas as observações (este pressuposto foi analisado graficamente através do gráfico dos resíduos *versus* valores preditos); b) os erros foram independentes entre si recorrendo ao teste estatístico de Durbin-Watson (t_{DW}), considerando o valor óptimo de t_{DW}=2 e um intervalo de confiança de $[1 \leq t_{DW} \leq 3]$; c) os erros foram normalmente distribuídos, analisado graficamente o gráfico papel de probabilidade.

Os erros (ou resíduos) foram representados pela soma dos quadrados dos desvios entre os valores preditos e os observados. As regressões foram descritas em função dos respectivos coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação (r^2), níveis de significância (p) e com indicação do número de observações (N). Para coeficientes de correlação compreendidos entre os $0.50<r<0.60$ as regressões obtidas foram consideradas baixas, para $0.60<r<0.90$ foram boas e para $r>0.90$ consideradas muito boas, de acordo com Bethea *et al*. (1995); Draper & Smith (1998). Os coeficientes de determinação obtidos para além de determinar a qualidade dos ajustes ocorridos entre as variáveis, permitiram indicar a percentagem de

variação da variável ou variáveis independentes explicada pela recta de regressão. Foram considerados os níveis de significância α=0.01 e α=0.05, definindo regressões significativas as que apresentaram um *p-value* (p) $\leq\alpha$.

Para a pesquisa de eventuais regressão lineares simples ou múltiplas ocorridas entre os diferentes parâmetros maregráficos estimados pela análise harmónica e os principais agentes hidrodinâmicos, consideraram-se que os primeiros corresponderam às variáveis dependentes, representados pelos períodos de enchente (P_e) e de vazante (P_v), ocorrência das estofas da BM e da PM (t_{BM}; t_{PM}), ocorrência e magnitudes das velocidades máximas de enchente e de vazante ($t_{u,max,e}$; $t_{u,max,v}$; $u_{max,e}$; $u_{max,v}$). As variáveis independentes corresponderam à variação da altura da maré (A_w), aos caudais fluviais médios (Q_r), aos parâmetros descritos pelo cubo da raiz quadrada da velocidade média quadrática (U_{rms}^3), pela relação de áreas intermareais e submareais. Testou-se igualmente a independência entre as variáveis recorrendo ao teste de colinearidade.

A escolha das funções matemáticas explicativas destas correlações obtidas, não se baseou na regressão que apresentou o maior coeficiente de determinação face ao número de observações, mas sim, deu-se preferência à função linear afim de não eliminar a variabilidade natural dos erros inerentes ao ajustamento ocorrido entre as variáveis independentes e dependentes. Quando a percentagem de variação da variável dependente relacionada com as magnitudes da velocidade foi explicada por uma regressão linear de r^2_{linear} inferior à regressão logaritmica (r^2_{log}), optou-se pela segunda em resultado da maioria dos perfis de velocidades efectuados na coluna de água terem apresentado um comportamento logaritmo.

Vectorização dos Levantamentos Batimétricos

A descrição morfológica e batimétrica do estuário efectuada no âmbito deste trabalho, teve por base o tratamento matemático da informação cartográfica que serviu de base, que resultou da junção dos levantamentos à escala 1:2000 da Direcção Geral dos Recursos e

Aproveitamentos Hidráulicos (1976) com os da Direcção Geral de Portos de 1988, de 1991, e de 1995.

O levantamento topográfico que teve por base a topografia fornecida pela Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (1976), e corrigida com o leito regularizado em 1983 pela empresa Hidroprojecto, Consultores de Hidráulica e Salubridade SARL, que serviu de base para as obras de regularização do troço do Mondego a jusante de Coimbra até aos Cinco Irmãos, representou a única informação cartográfica disponível e temporalmente mais próxima com os trabalhos de campo efectuados na parte superior do estuário, permitindo caracterizar topograficamente todo o troço de canal compreendido entre os Cinco Irmãos e o açude junto à Ponte da Granja do Ulmeiro, que representava a cabeça do estuário.

O levantamento batimétrico efectuado em 1988 pela Direcção Geral de Portos serviu de base para caracterizar a fisiografia do braço sul, considerou-se válido durante o decorrer dos trabalhos de campo, uma vez que a sua batimetria não apresentou grandes alterações naturais (com excepção do sector portuário, que sofreu alguns trabalhos de dragagem). Os levantamentos da DGP de 1988 e 1995 caracterizaram a batimetria do braço norte, antes e depois da regularização deste braço, e foram contemporâneos com os trabalhos de campo.

Os levantamentos anteriormente citados definiram valores batimétricos relativos ao zero hidrográfico (caracterizado pelo nível de referência utilizado nas cartas hidrográficas portuguesas e que se situa ligeiramente abaixo do nível das maiores baixa-mares das marés vivas, a 2m a baixo do "nível adoptado". O nível médio das águas do mar correspondeu ao nível, que num dado lugar à altura média da maré, e em função do tempo, foi obtido apartir de registos maregráficos durante um longo período de tempo. Consistiu no nível de referência adoptado para o cálculo da altitude (Instituto Hidrográfico, 1990).

A produção dos mapas foi efectuada recorrendo ao estimador de krigagem que é um interpolador exacto, cuja aplicação se tornou nas últimas décadas num dos métodos mais aplicados em geociências para obter representações contínuas de variáveis espaciais, a partir de pontos de amostragem discretos. Uma descrição detalhada desta metodologia sai do âmbito do presente trabalho, recomendando-se a consulta de Chauvet (1992) para uma familiarização com as suas potencialidades. Na prática foi utilizado o software SURFER (Golden Software, 2002), que incorpora diversos métodos de interpolação, entre os quais se encontra a krigagem. A vectorização desta informação permitiu determinar um conjunto de parâmetros fisiográficos, nomeadamente o cálculo de áreas e volumes de vários ambientes do estuário, largura, comprimento e profundidades médias.

4.4. Pressupostos e Considerações

No âmbito dos objectivos deste trabalho, considerou-se o estuário do Mondego como um ambiente interior, semifechado e costeiro de transição entre o continente e o mar aberto, que se estendeu desde a extremidade dos molhes externos da embocadura até ao limite da maré dinâmica. Foi caracterizado por uma zona de mistura entre águas marinhas movimentadas fundamentalmente pela maré e por águas doces transportadas pelas descargas fundamentalmente pelo rio Mondego, podendo esta também estender-se para a zona costeira sob a forma de uma pluma túrbida estuarina.

Foi adoptado um sistema de eixos cartesianos, com o eixo coordenado O_x orientado longitudinalmente ao estuário com origem na cabeça, no açude da ponte de Formoselha, e que descreveu valores positivos em direcção à foz. O eixo O_y foi disposto transversalmente ao anterior e orientado positivamente para a margem direita. O eixo O_z teve origem junto ao fundo, considerando-o uniforme e constante e com sentido oposto à aceleração gravítica. Muito embora tenha permitido a definição de três componentes para a velocidade (designadas

de u_x, u_y e u_z), no campo só se mediu a componente longitudinal (u_x), tendo-se considerado velocidades positivas as da vazante e negativas as que apresentaram o sentido da enchente.

Considerou-se que as massas de água em circulação no estuário, ao escoarem ao longo dos canais mais importantes sofreram variações de forma, apresentando uma constância no seu volume e uma capilaridade nula, à semelhança do considerado por exemplo por Lencastre & Franco (1992) e Lencastre (1996). A sua compressibilidade e o seu efeito na variação da sua massa específica também foi considerada desprezável, uma vez que as forças envolvidas nestes fluxos não induziram deformações mensuráveis nos respectivos corpos líquidos (van Rijn 1993). Estes fluidos em trânsito no estuário também foram considerados newtonianos uma vez que as tensões geradas foram directamente proporcionais às taxas de deformações, como considerado por Lencastre (1996) para este tipo de sistemas. Também foram classificados de fluidos não ideais por apresentarem gradientes de velocidade quando em movimento e por se desenvolverem forças de atrito no seu interior. A complexa interacção ocorrida entre os vários agentes hidrodinâmicos intervenientes neste sistema estuarino, representados principalmente pelas correntes de maré e pelos caudais fluviais, permitiu caracterizar os escoamentos de regime variável ou não estacionários, uma vez que a configuração dos seus movimentos variou ao longo da escala de tempo em análise (12.42h). Durante os curtos períodos correspondentes às estofas de maré, com durações compreendidas entre as 0.17h e as 0.25h os escoamentos foram considerados permanentes, ou estacionários uma vez que as características do fluxo permaneceram constantes ao longo do tempo, com velocidade média nula (Dyer, 1986, 1973). Consideraram-se permanentes, as leituras da velocidade longitudinal efectuadas ao longo da coluna de água, em cada ponto de amostragem, nas diferentes estações do estuário.

As variações do nível médio da superfície com origem meteorológica no estuário foram consideradas desprezíveis à escala deste trabalho. A pressão atmosférica também foi considerada constante em todo do estuário.

Considerou-se que a distribuição da salinidade no estuário constituiu uma propriedade conservativa aquando de regimes bem misturados ou parcialmente misturados, à semelhança de Raudsepp (1998). A distribuição longitudinal da salinidade no estuário e o tempo de residência foram calculados com base nos princípios da conservação de sal e do volume, à semelhança de Pitts (1998), Officer & Crester (1991).

Considerou-se como antrópico ou antropogénico, qualquer fenómeno ou mecanismo desencadeado directa ou indirectamente pelo homem, tais como, obras de engenharia costeira e de regularização fluvial; barragens, trabalhos de dragagem, etc..

A elaboração do modelo hidrodinâmico e do transporte sedimentar do estuário do Mondego baseou-se em várias teorias, fundamentadas nos seguintes pressupostos:

a) recorreu-se apenas a modelos e/ou teorias que tentam simular os fenómenos e processos naturais relacionados com a propagação da maré em estuários pouco profundos. Estes modelos basearam-se nas equações do movimento cuja resolução analítica necessitou previamente de diversas simplificações relativas às propriedades dos fluidos, dos escoamentos e das características geométricas do estuário. Contudo, foram calibrados com dados de campo e/ou processados em laboratório;

b) considerou-se o estuário como sistema unidimensional de interface entre o mar e rio, com uma hidrodinâmica regulada fundamentalmente pela maré e pelos caudais fluviais, embora a maré corresponda ao processo hidrodinâmico dominante. Não foi possível entrar em consideração com a acção da agitação marinha e do vento na dinâmica estuarina, em consequência de limitações instrumentais e logísticas que inviabilizaram as respectivas medições aquando das actividades de campo;

c) assumiu-se que a salinidade e a água doce são usados como traçadores em quadros dinâmicos estacionários. A geometria do estuário foi simplificada, assumindo separadamente os dois braços do estuário, como canais simples de secção transversal do tipo trapezoidal. A variação da altura da maré ($A_{w,x,t}$), a magnitude dos caudais fluviais ($Q_{r,x,t}$) e a variação da salinidade na zona costeira ($S_{o,t}$) correspondem às variáveis do modelo;

d) muito embora determinados quadros hidrodinâmicos do estuário, não tenham sido documentados com medições de campo, nomeadamente regimes de marés mortas sob descargas do Mondego elevadas e também aquando de cheias, estes foram inferidos tendo por base os resultados obtidos;

e) a cobertura superficial dos canais mais importantes do estuário apresentava-se constituída essencialmente por depósitos sedimentares desprovidos de propriedades coesivas, detríticos;

f) a lei de distribuição de pressões é considerada hidrostática. O facto de a onda de maré ser uma onda longa pressupôs-se que o escoamento é fundamentalmente segundo a componente longitudinal. A baixas profundidades, considerou-se a componente vertical da velocidade desprezível relativamente à componente horizontal;

g) o fluido é considerado incompressível, para a gama de valores da pressão envolvida.

4.5. Representatividade das Estações Estuarinas

As quatro estações definidas no estuário, foram escolhidas por não só por se encontrarem distribuídas, quer espacialmente no estuário, quer nos dois canais principais, mas também por se encontrarem posicionadas em diferentes sectores do estuário com características fisiográficas distintas entre si. Três destas estações posicionaram-se no canal principal, uma a 1.5km da foz do estuário e as restantes a 7.5km e a 15.5km. Corresponderam às estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Elevatória. Na primeira, os parâmetros medidos e

as respectivas deduções dinâmicas e sedimentares consideraram-se ter sido representativas do sector distal do canal principal, enquanto as restantes, foram representativas da dinâmica dos sectores médio (ou central) e da parte superior deste canal. Os resultados obtidos na estação da Gala, estação localizada no braço sul, a 3km da foz e a 1.5km da confluência distal com o braço norte, foram considerados representativos da hidrodinâmica e dos processos sedimentares dos sectores distal e médio do braço sul, por esta estação se encontrar numa posição de transição entre estes domínios fisiográficos.

4.6. Limitações Impostas pelas Metodologias Adoptadas

A planificação da amostragem teve em conta, não só a acessibilidade dos locais com os meios disponíveis, como também e sobretudo, a distinção de diferentes ambientes hidrodinâmicos e sedimentares do estuário e nas zonas costeira e fluvial adjacente. Tendo por base os objectivos previamente delineados, tiveram que se executar vários planos de amostragem relacionados entre si, quer para o estudo hidrodinâmico, quer da cobertura e do transporte sedimentar.

Para além da dimensão da área de estudo tornar muito difícil a aplicação na íntegra deste ambicioso plano de amostragem, a ocorrência de condicionalismos de vária ordem inviabilizam muitas das vezes o cumprimento das tarefas de campo delineadas. Salienta-se por exemplo a obtenção de séries de alguns dados de parâmetros físicos muitas das vezes incompletas, por não ter sido possível cumprir os ciclos completos de maré, ou por não ter sido possível executar o número mínimo de 4 leituras de parâmetros em cada fase da maré, em cada ponto de amostragem, de cada estação. O desaparecimento no laboratório de dezenas de amostras de sedimento referentes a campanhas completas de campo já realizadas.

Estes e outros condicionalismos relacionados, traduziram-se por vezes num reduzido número de séries de dados depois estudadas, comprometendo possíveis interpretações, análise e tendências de variação dada a complexidade de fenómenos naturais em estudo. Dá-se como

exemplo a estação Elevatória onde só foi possível analisar 3 ciclos de completos maré, muito embora o insucesso de mais outras tantas tentativas para o fazer.

Acresceu o facto de ter sido impossível desenvolver campanhas de campo aquando de quadros hidrodinâmicos considerados extremos, nomeadamente aquando de grandes cheias anuais, ou aquando de temporais e fenómenos de storm surge, como ainda, aquando de quadros de marés vivas sob a influência de baixos regimes do Mondego. Desta forma, as séries de dados analisadas no estuário ao carecer desta informação, explicam parcialmente a variabilidade natural do sistema.

Realça-se também o facto de no ambiente marinho, muitas das vezes não ter sido possível cumprir com os planos de amostragem delineados, dadas as dificuldades de saída e entrada da barra do porto com a embarcação usada, e consequentemente maior a dificuldade em caracterizar a parte deste sistema adjacente ao estuário do Mondego.

Refere-se igualmente o facto de a variação da superfície livre registada nas quatro estações do estuário ter sido obtida com à recurso da embarcação, e desta forma os erros associados terem sido relevantes dada a impossibilidade de fundear e manter a embarcação sempre no mesmo lugar, durante um ciclo completo de maré. A Embocadura foi a estação onde estes problemas foram mais significativos, em resultado da maior profundidade do canal e do maior hidrodinamismo. Contudo, os resultados assim obtidos foram confrontados com os resultantes do tratamento das constituintes harmónicas obtidas por Baptista (1990) e avaliados os respectivos erros.

CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esquema de Análise dos Dados

No presente capítulo, apresentam-se e descrevem-se os resultados já tratados recorrendo a ilustrações através de figuras, de auxiliares gráficos e quadros considerados convenientes. Paralelamente procede-se a uma análise e interpretação dos resultados à luz do conhecimento actual, dando informações sobre a confirmação ou não das hipóteses inicialmente apontadas.

A lógica interna do trabalho é que determina a sequência dos assuntos abordados neste capítulo, iniciando-se com uma análise da variação da superfície livre no estuário do Mondego no subcapítulo 5.1. Segue-se-lhe no subcapítulo 5.2 uma análise da fisiografia do estuário, onde são definidos vários ambientes, feita uma análise dimensional de vários parâmetros geométricos, e são definidas unidades fisiográficas. No subcapítulo 5.3 faz-se uma análise hidrodinâmica do estuário onde são definidas as principais propriedades dos escoamentos, determinadas relações ocorridas entre vários parâmetros maregráficos, identificadas as massas de água, e quantificados os volumes líquidos em circulação no estuário e a distorção da maré. São definidos os tempos de residência da massa de água estuarina e propostos diagramas de circulação-estratificação. No subcapítulo 5.4 são descritos os sedimentos que constituem a cobertura detrítica do estuário quanto às principais propriedades que mais interferem no transporte sedimentar, e definidos diversos ambientes dinâmico-sedimentares. Por fim, no subcapítulo 5.5 são apresentados e analisados os resultados referentes ao transporte sedimentar medidos no estuário, e comparados com as taxas de transporte teóricas resultantes da aplicação de modelos matemáticos. É definido um modelo conceptual de circulação e transporte geral do estuário.

Subcapítulo 5.1. Variação da Superfície Livre no Estuário

Antes de se proceder à análise fisiográfica do estuário houve necessidade de introduzir previamente este capítulo relativo à definição dos diferentes patamares médios da maré. Assim, tendo por principal objectivo estabelecer o comportamento da variação vertical da superfície livre

no tempo e ao longo dos canais principais, procedeu-se ao tratamento matemático de algumas das constituintes harmónicas gravíticas determinadas por Baptista *et al* (1990) e publicadas em Baptista *et al* (1995). Os resultados obtidos permitiram identificar diferentes níveis críticos médios da maré para o estuário, bem como, determinar a sua variabilidade espacial para vários sectores deste sistema costeiro. Também possibilitaram definir e cartografar os diferentes ambientes do estuário que se relacionaram com a influência das marés, e realçar as diferenças registadas na variação do nível da água ocorridas entre os dois canais principais. Tornaram igualmente exequível a análise quantitativa da distribuição das respectivas áreas cartográficas e dos volumes geométricos da Zona de Mistura para diferentes quadros dinâmicos. Permitiram também fazer um estudo comparativo com outros resultados maregráficos obtidos no âmbito deste trabalho.

5.1.1. Patamares Médios da Maré

Para a identificação dos diferentes níveis críticos médios da variação da superfície livre no interior do estuário procedeu-se à análise das amplitudes das constituintes harmónicas astronómicas M_2, S_2, K_1, e O_1 publicadas em Baptista *et al* (1995) para diferentes sectores deste sistema, encontrando-se expressas no quadro 3.1. Recorrendo aos modelos descritos em van Rijn (1994) e apresentados no quadro 4.4 e tendo por base o nível médio da maré previsto pelo Instituto Hidrográfico para o porto da Figueira da Foz de $h_o \approx +2mZH$ foram determinados para cada uma das seis estações (figura 3.1) os diferentes níveis críticos da maré, representados pela preia-mar média das marés vivas (PMMMV), pela baixa-mar média das marés vivas (BMMMV), pela amplitude (altura) média das marés vivas (AMMV), pela preia-mar média das marés mortas (PMMMM), pela baixa-mar média das marés mortas (BMMMM), pela amplitude média das marés mortas (AMMM), pela preia-mar máxima (PMMax), pela baixa-mar mínima anual (BMMin), pela altura máxima da maré (AMax), pela altura média da maré (AMM), pela preia-mar média anual (PMM), pela baixa-mar média anual (BMM) e pela diferença máxima diária da maré (DMM), encontrando-se os resultados obtidos expressos no quadro 5.1. 1.

Dos resultados obtidos, verificou-se que ocorreram variações na magnitude dos patamares médios da maré entre as diferentes estações em estudo. Relativamente à estação 6 localizada na zona costeira adjacente, verificou-se uma tendência de decréscimo da amplitude da maré para o estuário, dado que $(AMM)_{est,6}\approx$2mpassou para magnitudes de $(AMM)_{est,4}\approx$1.8m.

Quadro 5.1. 1. Níveis críticos da maré calculados para as diferentes estações do estuário do Mondego. Na primeira linha, Dist simbolizou a distância longitudinal em km que as estações apresentaram relativamente à foz do Mondego. Os restantes parâmetros representam as diferentes níveis ou alturas da maré expressos em mZH ou em metros, tendo correspondido PMMMV à preia-mar média das marés vivas, BMMMV à baixa-mar média das marés vivas, AMMV à amplitude (altura) média das marés vivas, PMMMM à preia-mar média das marés mortas, BMMMM à baixa-mar média das marés mortas, AMMM à amplitude média das marés mortas, PMMax à preia-mar máxima, BMMin à baixa-mar mínima, AMax à altura máxima da maré, AMM à altura média da maré, PMM à preia-mar média anual, BMM à baixa-mar média anual, DMM à diferença máxima diária da maré, PF ao parâmetro de forma da maré e Mbn, Mbs e ME aos valores médios dos diferentes parâmetros respectivamente para o braço norte (considerando as estações 1, 2, 3 e 4), para o braço sul (ponderando as estações 4 e 5) e para todo o estuário (avaliando as estações 1, 2, 3, 4 e 5).

estações	Dist.	PMMMV	BMMMV	AMMV	PMMMM	BMMMM	AMMM	PMMax	BMMin	AMax	AMM	PMM	BMM	DMM	PF
	(km)	(mZH)	(mZH)	(m)	(mZH)	(mZH)	(m)	(mZH)	(mZH)	(m)	(m)	(mZH)	(mZH)	(m)	(m)
1 (≈E.Elv.)	17.0	3.05	0.95	2.10	2.52	1.48	1.04	3.19	0.81	2.38	1.57	2.79	1.21	0.14	0.13
2 (ponte CP)	12.0	2.97	1.03	1.94	2.48	1.52	0.97	3.09	0.91	2.18	1.45	2.73	1.27	0.12	0.13
3 (Met.Font.)	5.5	3.06	0.94	2.13	2.51	1.49	1.01	3.19	0.81	2.37	1.57	2.79	1.22	0.12	0.12
4 (≈Emb.)	1.6	3.20	0.80	2.40	2.56	1.44	1.13	3.34	0.67	2.67	1.77	2.88	1.12	0.13	0.11
5 (≈Gala)	4.1	3.24	0.76	2.49	2.58	1.42	1.15	3.38	0.63	2.75	1.82	2.91	1.09	0.13	0.11
6 (ao largo)	-1.0	3.35	0.65	2.71	2.66	1.35	1.31	3.49	0.51	2.99	2.01	3.00	1.00	0.14	0.10
Mbn -	-	3.07	0.93	2.14	2.52	1.48	1.04	3.20	0.80	2.40	1.59	2.80	1.21	0.13	0.12
Mbs -	-	3.22	0.78	2.45	2.57	1.43	1.14	3.36	0.65	2.71	1.79	2.90	1.10	0.13	0.11
ME -	-	3.1	0.9	2.2	2.5	1.5	1.1	3.2	0.8	2.5	1.6	2.8	1.2	0.13	0.12

No interior do estuário constatou-se que as marés vivas apresentaram amplitudes médias compreendidas entre os 1.9≤AMMV≤2.5m definidas apartir de preia-mares médias com cotas abrangidas entre os 2.9≤PMMMV≤3.2mZH e baixa-mares entre os 0.8≤BMMMV≤1.0mZH. Para as marés mortas verificou-se que a amplitude média da maré no estuário oscilou entre os 0.9≤AMMM≤1.2m, tendo sido definida apartir preia-mares com cotas médias abrangidas entre 2.5≤PMMMM≤2.6mZH e baixa-mares entre os 1.4≤BMMMM≤1.5mZH. Comparativamente à estação ao largo apontaram para um decréscimo da amplitude das marés de quadratura, uma vez que $(AMMM)_{est,6}\approx$1.3m, $(PMMMM)_{est,6}\approx$2.7mZH e $(BMMMM)_{est,6}\approx$0.65mZH. A amplitude máxima da maré estimada para o estuário terá rondado nas diferentes estações, magnitudes compreendidas entre os 2.2≤AMax≤2.8m, definidas apartir de preia-mares com cotas cingidas entre os 3.1≤PMMax≤3.4mZH e baixa-mares abrangidas entre os 0.6≤BMMin≤0.9mZH. Estas representaram um decréscimo da amplitude máxima da superfície livre relativamente à zona costeira adjacente, que foi definida por $(AMax)_{est,6}\approx$3m, $(PMMax)_{est,6}\approx$3.5mZH e

$(BMMin)_{est,6}$≈0.5mZH. Analisadas as marés anuais médias no estuário, verificou-se que apresentaram amplitudes compreendidas entre os 1.5≤AMM≤1.8m, definidas apartir de preia-mares médias com cotas abrangidas entre os 2.7≤PMM≤2.9mZH e baixa-mares entre os 1.1≤BMM≤1.3mZH. À semelhança dos parâmetros anteriores, estes também descreveram um decréscimo generalizado da amplitude da onda de maré para o estuário, uma vez que as marés ao largo foram em média de maior amplitude com $(AMM)_{est,6}$≈2.0m, $(PMM)_{est,6}$≈3.0mZH e $(BMM)_{est,6}$≈1.0mZH. Esta dissipação de energia terá estado relacionada com a propagação da onda de maré nesta zona muito pouco profunda da plataforma (de cotas inferiores a ≈-14mZH) e com a sua entrada no sector distal do estuário, definido por uma fisiografia mais constrita (estações 6 e 4).

De acordo com o quadro 5.1. 1, o registo de uma altura máxima da maré no interior do estuário de $(AMax)_{est,5}$≈2.75m e na zona costeira adjacente de $(AMax)_{est,6}$≈2.99m, permitiu classificar o regime de maré como mesomareal ($2<A_{w,max}<4$m) de acordo com Davies (1964). Os resultados referentes à diferença máxima diária da maré (DMM) obtidos nas estações do estuário reflectiram que a maior discrepância de amplitudes entre duas marés consecutivas teve lugar na embocadura, decrescendo esta ligeiramente para montante para os 0.12. A análise dos resultados obtidos do parâmetro de forma da maré (PF), permitiu depreender ter havido uma tendência de aumento deste para montante, com magnitudes compreendidas entre os 0.11≤PF≤0.13. Uma vez que também foram muito inferiores a PF≤0.25, de acordo com o descrito em van Rijn (1994), estes resultados terão reflectido comportamento claramente semidiurno por parte da maré no estuário, definida por duas preia-mares e duas baixa-mares diárias, com amplitudes muito idênticas.

5.1.2. Variação Longitudinal da Superfície livre

Na figura 5.1. 1 encontram-se representados graficamente os diferentes patamares médios da superfície livre determinados para as diversas estações, que por sua vez se encontravam dispostos longitudinalmente aos dois braços do estuário. Da análise destes parâmetros foi possível definir que os diferentes patamares médios das fases da preia-mar (das PMMax, das PMMV, das PMM e das

PMMMM) registados no interior do estuário definiram tendências de decréscimo das suas cotas ao longo do canal principal, abrangendo as estações 4, 3 e 2. Estas estações descreveram para as baixa-mares tendências opostas, definindo cotas das BMMin, das BMMV, das BMM e das BMMMM tendencialmente mais elevadas para o interior do estuário, como se ilustra na figura 5.1. 1. Nos troços de canal representados pelas estações 2 e 1 e definidos pelas estações 4 e 5 registaram-se tendências de variação longitudinais contrárias a estes parâmetros. Os diferentes níveis respeitantes às preia-mares descreveram tendências de aumento das respectivas cotas para montante, enquanto os das baixa-mares definiram tendências de decréscimo, de acordo com o gráfico da figura 5.1. 1.

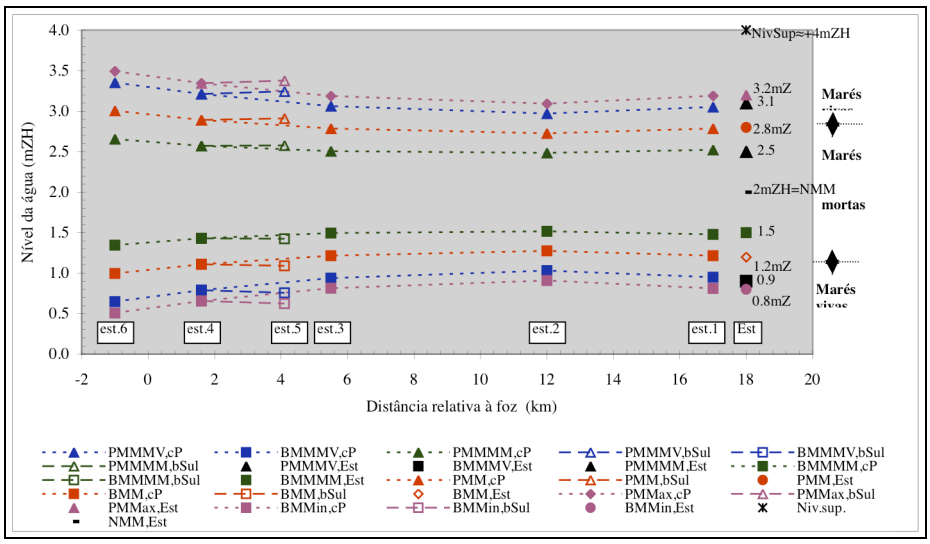


Figura 5.1. 1. Variação dos diferentes níveis críticos médios da superfície livre nos diversos sectores do estuário do Mondego. Projecção dos níveis adoptados para diferenciar as marés vivas das mortas. Na legenda, NivSup estabeleceu o nível máximo considerado atingido pela superfície livre aquando de cheias do Mondego ou de temporais. cP e bSul representaram respectivamente os diferentes níveis críticos da maré determinados para as estações do canal principal e do braço sul. A designação Est referiu-se aos patamares médios estimados para representar a variação da superfície livre em todo o estuário, enquanto est.1, est.2, est.3, est.4, est.5 e est.6 simbolizaram as estações 1, 2, 3, 4, 5, e 6 referenciadas na figura 3.1.

Na figura 5.1. 2 representam-se graficamente as variações da amplitude da maré ocorridas nas diferentes estações em estudo. Quando analisadas as diferentes amplitudes da maré registadas nas estações 6 e 4, verificou-se ter havido um decréscimo generalizado de AMMM, AMM, AMMV, e AMax aquando da entrada da onda de maré no estuário. Em média definiu um desnível da variação da superfície livre da ordem dos 0.23m quando comparadas as AMM. Segundo van Rijn (1994) e Dyer (1997) os fenómenos de refracção, reflexão e amortecimento da onda de maré apresentam uma grande importância nos ambientes menos profundos da plataforma continental,

tornando-se os dois primeiros praticamente insignificantes nos estuários de reduzidas dimensões. Contudo, entre estas duas estações, o fenómeno de convergência (arrasamento) terá tido uma importância relativa considerável aquando da entrada da onda de maré por entre os molhes externos do estuário.

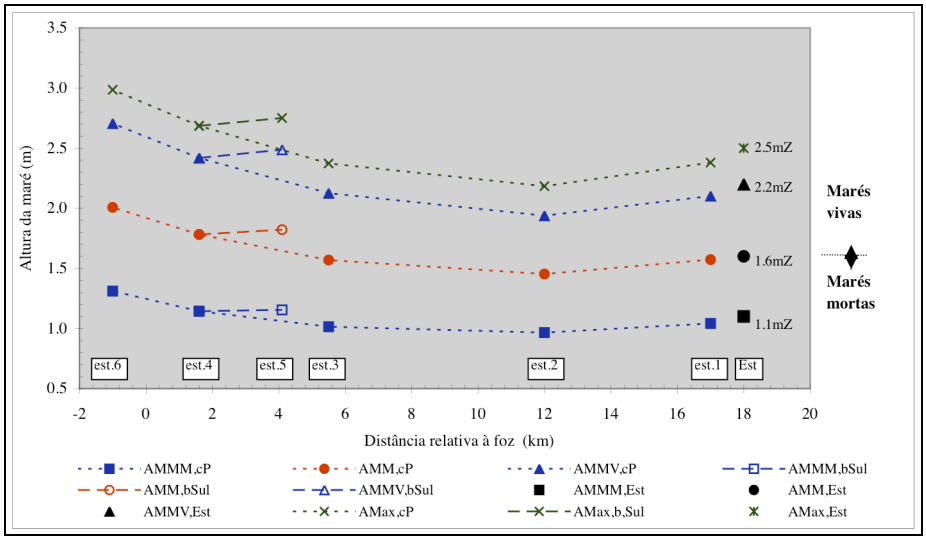


Figura 5.1. 2. Variação da amplitude da maré nos diferentes sectores do estuário do Mondego. Projecção da amplitude da maré critica adoptada para diferenciar as maré.

A propagação da maré ao longo do canal principal do estuário foi igualmente caracterizada por decréscimo longitudinal da sua amplitude, que entre as estações 4 e 3 foi da ordem dos ≈0.21m e que representou uma taxa média longitudinal de diminuição de AMM de ≈0.05m/km. Entre as estações 3 e 2 passou a haver uma taxa de decréscimo de AMM da ordem dos 0.02m/km, obtida apartir de uma diferença média de amplitudes $(AMM)_{est,3}$-$(AMM)_{est,2}$≈0.19m (figura 5.1. 2). Esta diminuição de A_w registada ao longo do braço norte terá estado fundamentalmente relacionada com uma dissipação da sua energia por parte do atrito gerado entre a propagação da onda e o fundo deste troço de canal, conferindo-lhe um comportamento hipo-síncrono *sensus* Le Floch, 1961 *in* Borrego *el al* (1995) e Dyer (1997). No troço de canal estuarino mais proximal compreendido entre as estações 2 e 1, os resultados obtidos passaram a descrever uma tendência de aumento da amplitude da maré para montante, que terá sido da ordem dos 0.02m/km, uma vez que $(AMM)_{est,1}$-$(AMM)_{est,2}$≈0.12m. Igual tendência de incremento de A_w para montante foi registada no braço sul, quando comparadas as AMM das estações 4 e 5. Estas definiram uma diferença de amplitudes

médias de 0.04m, que descreveu uma taxa média de aumento de A_w semelhante à anterior, de ≈0.02m/km (figura 5.1. 2). Estas tendências de aumento da amplitude da maré nestes dois troços de canal estuarino ter-se-ão relacionado fundamentalmente com o fenómeno de arrasamento, que de acordo com van Rijn (1994), Tonda (1999), ocorre quando a onda de maré perde celeridade aquando da propagação num canal estuarino pouco profundo caracterizado por um decréscimo da sua largura para montante mais significativo ao ocorrido com a sua profundidade (fenómeno de convergência). Este comportamento hipso-síncrono *sensus* Le Floch, 1961 *in* Borrego *el al* (1995) da maré encontra-se igualmente associado a uma diminuição do comprimento de onda ($L_w=u_w*T_w$) e a um aumento da amplitude da onda de maré, sendo reflexo da interacção dos escoamentos com a fisiografia destes troços de canal.

Para caracterizar a variação da superfície livre ocorrida no canal principal do estuário considerou-se a média aritmética dos diferentes patamares da maré obtidos apenas nas estações 1, 2, 3 e 4, enquanto para o braço sul foram analisados unicamente os parâmetros da estação 5, encontrando-se os resultados obtidos designados respectivamente por Mbn e Mbs no quadro 5.1. 1. Da análise deste quadro, foi possível apurar que a variação da componente vertical da maré apresentou magnitudes médias distintas nos dois canais do estuário. No canal principal, as marés não só foram de menor amplitude comparativamente às do braço sul, como também representaram variações longitudinais e comportamentos de $A_{w,x}$ distintos (figuras 5.1. 1 e 5.1. 2).

Para a definição dos patamares médios representativos da variação da superfície livre em todo o estuário do Mondego, optou-se por considerar o cálculo das médias aritméticas dos diferentes parâmetros maregráficos registados nas 5 estações em estudo. Esta escolha recaiu na ponderação quer das reduzidas dimensões deste estuário, quer no facto de as estações 1 a 5 terem-se encontrado dispostas longitudinalmente aos dois canais com distâncias relativas entre si mais ou menos equidistantes, representando os diferentes sectores deste sistema. Acresceu o facto de as amplitudes de variação da superfície livre máximas registadas longitudinalmente entre estas

estações terem sido pequenas, sempre inferiores a 0.18m. Os resultados obtidos encontram-se representados no quadro 5.1. 1 sob a designação ME e projectados respectivamente nas figuras 5.1. 1 e 5.1. 2 sob a designação de Est. Embora estes valores tenham correspondido a níveis médios anuais estimados para o estuário, consideraram-se representativos das variações mais frequentes das amplitudes do nível da água, admitindo-se contudo que possam ter sofrido ocasionalmente oscilações provocadas por quadros de temporal ou de cheia por parte do Mondego, bem como, a fenómenos associados à sobreelevação do nível da água do mar com origem meteorológica.

Para diferenciar as marés vivas das mortas foram considerados os níveis críticos médios anuais da variação da superfície livre representados pelas preia-mares médias anuais e pelas baixa-mares médias anuais, que no estuário corresponderam a PMM≈+2.8mZH e a BMM≈+1.2mZh. Estes níveis descreveram amplitudes de maré de AMM≈1.6m de acordo com o quadro 5.1. 1. Foram designadas por marés mortas as que ostentaram amplitudes inferiores a $A_w \leq 1.6$m, definidas apartir de preia-mares com cotas inferiores a PM≤2.8mZH e baixa-mares com cotas superiores a BM≥1.2mZh. As marés vivas foram apresentadas por amplitudes (alturas) superiores a $A_w > 1.6$m e necessariamente por cotas de PM>+2.8mZH e BM<+1.2mZH, como se ilustra nas figuras 5.1. 1 e 5.1. 2.

Neste trabalho, sempre que as séries de dados obtidas no campo dispuseram de informação maregráfica capaz de determinar a amplitude da maré, esta foi comparada e classificada de acordo com os patamares médios da variação da superfície livre anteriormente determinados para o estuário, permitindo a respectiva graduação em marés vivas ou mortas. Contudo, nos casos em que não se dispôs daquela informação, como por exemplo aquando das medições de parâmetros físico-químicos pontuais ou segundo perfis longitudinais aos canais principais do estuário, houve necessidade de recorrer a amplitudes da maré tabeladas pelo Instituto Hidrográfico (IH), pelo que se procedeu de igual forma para determinar os níveis críticos médios e para diferenciar as marés vivas das mortas. Apartir das constituintes harmónicas do quadro 3.2 e recorrendo aos modelos

apresentados no quadro 4.4 calcularam-se os patamares para as séries referenciadas com as tabelas da variação da superfície livre do IH, constantes no quadro 5.1. 2, procedendo-se igualmente à diferenciação das marés vivas das mortas, adoptando-se as cotas correspondentes às PMM_{IH} e às BMM_{IH}.

Quadro 5.1. 2. Elementos de maré considerados para as variação da superfície livre tabeladas pelo Instituto Hidrográfico, determinados apartir das constituintes harmónicas apresentadas no quadro 3.2.

PMMMV (mZH)	BMMMV (mZH)	AMMV (m)	PMMMM (mZH)	BMMMM (mZH)	AMMM (m)	PMMax (mZH)	BMMin (mZH)	AMax (m)	AMM (m)	PMM (mZH)	BMM (mZH)	DMM (m)	PF (m)
3.38	0.62	2.76	2.66	1.34	1.33	3.51	0.49	3.02	2.05	3.02	0.98	0.13	0.09

Quando comparados os patamares médios da maré calculados com base nas constituintes harmónicas obtidas quer por Baptista (1990), quer pelo Instituto Hidrográfico, verificou-se que ambos os resultados foram semelhantes, apresentando apenas algumas diferenças de poucos centímetros em alguns dos parâmetros.

5.1.3. Ambientes Considerados

Uma vez delimitados os diferentes níveis críticos médios da variação da superfície livre para o estuário do Mondego, foi possível definir os ambientes deste sistema que sofreram uma influência diária, quinzenal ou anual por parte das marés, bem como, as zonas só inundadas durante quadros de marés vivas associados a tempestades ou a cheias por parte do rio Mondego. Desta forma foram identificados os ambientes submareais, os intermareais e os supramareais, de acordo com o quadro 5.1. 3.

Os ambientes inframareais ou submareais foram descritos pelas zonas do estuário sempre imersas, localizadas abaixo da zona de influência da maré a cotas inferiores à BMMin, ou seja, $\Delta\eta<+0.8$mZH. No quadro 5.1. 3 foram designados por ambientes submareais permanentes (ASP).

Os ambientes intermareais do estuário foram subdivididos nas zonas frequentemente sujeitas à influência da maré (AIF) e nas zonas que o foram esporadicamente. As primeiras foram representadas pelos ambientes compreendidos entre as preia-mares e as baixa-mares mais frequentes no estuário, localizados respectivamente entre as cotas PMM≈+2.8mZH e as BMM≈+1.2mZH, definindo uma variação da superfície livre de ≈1.6m. Estes ambientes foram

representativos das variações mais frequentes da superfície livre no estuário, muito embora ocasionalmente a influência bidiária da maré possa ter-se feito sentir em níveis batimétricos pouco mais a baixo ou pouco mais a cima aos adoptados. Os domínios intermareais esporádicos localizaram-se imediatamente a cima e a baixo dos AIF, abrangendo os sectores do estuário não só inundados e/ou emersos quinzenalmente durante as marés vivas, como também os anualmente durante marés de maior amplitude. O domínio intermareal esporádico superior (AIEI) foi delimitado inferiormente pela cota da PMM (>+2.8mZH) e superiormente pela PMMax=+3.2mZH. Representou os ambientes do estuário praticamente inundados pelas marés vivas, uma vez que a diferença média de cotas registada entre a PMMax e a PMMMV foi de apenas 0.1m. Imediatamente a baixo dos AIF, definiram-se os ambientes intermareais esporadicamente emersos (AIEE) que ocuparam uma posição simétrica à do AIEI tendo por referência o nível médio da maré NMM=2mZH. Os seus limites foram definidos pela BMMin e pela BMM, com 0.8≤AIEE<1.2mZH. À semelhança do ambiente anterior, representaram praticamente as variações da superfície livre mais frequentes das marés vivas uma vez que a diferença de cotas médias entre BMMMV com BMMin foi de apenas 0.1m. Estes dois ambientes foram inundados por marés de amplitudes compreendidas entre os $1.6<A_w\leq 2.5$m (quadros 5.1. 1 e 5.1. 3).

Quadro 5.1. 3. Ambientes adoptados para o estuário do Mondego função dos patamares médios da variação da superfície livre que resultaram de uma simplificação espacial e sua breve descrição.

Domínios considerados	**Níveis críticos da superfície livre**	**Descrição dos ambientes estuarinos**
..... Níveis de cheia e/ou de "storm surge" (**AS**)	**≈+4.0mZH**	Limite superior considerado para o estuário. Descreveu os domínios supramareais inundados quer durante quadros de cheia do rio Mondego, quer durante marés vivas conjugadas com sobreelevação do nível da água de origem meteorológica (temporal) (com 3.2<AS≤4mZH).
..... Ambientes intermareais esporadicamente imersos (**AIEI**)	**≈+3.2mZH≈PMMax** 3.1mZH ≈PMMMV	Domínios do estuário esporadicamente inundados durante as marés vivas e/ou aquando das marés de maior amplitude. Compreendidos entre os 2.8<AIEI≤3.2mZH.
..... Ambientes intermareais mais frequentes (**AIF**)	**≈+2.8mZH≈PMM** 2.5mZH ≈PMMMM **NMM≈2.0mZH** 1.5mZH≈BMMMM	Zonas intermareais sujeitas a duas imersões diárias da maré. Compreendidos entre os 1.2<AIF≤2.8mZH. Representaram uma variação média da superfície livre de $A_w\approx 1.6$m.
..... Ambientes intermareais esporadicamente emersos (**AIEE**)	**≈+1.2mZH≈BMM** 0.9mZH ≈ BMMMV **≈+0.8mZH≈BMMin**	Domínios do estuário esporadicamente emersos durante as maré vivas e/ou aquando das marés anuais de maior amplitude. Compreendidos entre os 0.8<AIEE≤1.2mZH.
..... Ambientes submareais permanentes (**ASP**)		Sectores dos canais do estuário permanentemente submersos, apresentando cotas sempre inferiores à BMMin (com ASP≤0.8mZH).

Os ambientes supramareais em análise localizaram-se a cotas acima da zona de influência da maré, mas apenas representaram os domínios que puderam ter sido submersos aquando de quadros de cheias por parte do Mondego ou ainda sob condições de storm surge. Tendo por base o nível de sobreelevação máxima de 0.78m determinada para a ria de Aveiro por Gama *el al* (1994) e Gama *el al* (1997), assumiu-se que tal magnitude possa ter sido representativa do incremento da superfície livre no estuário do Mondego sob condições meteorológicas similares, dada a proximidade geográfica dos dois sistemas costeiros. Esta magnitude de sobreelevação do nível da água de ≈+0.8m quando adicionada à base deste domínio de PMMax≈+3.20mZH, permitiu projectar o seu limite superior para os ≈+4mZH (designado por NivSup na figura 5.1. 1). Cota de igual magnitude foi também corroborada para este ambiente sobremareal, mas tendo por base a análise de informação local fundamentada em marcas de níveis máximos de cheia históricas assinaladas em vários palheiros de saliculturas localizados na ilha da Murraceira, mas das quais não foi possível confirmar com precisão as respectivas datas de ocorrência. Este domínio foi também designado de nível de cheia e/ou de storm surge de acordo com o quadro 5.1. 3.

No Capítulo 5.2 os patamares médios usados para a definição dos diferentes ambientes relacionados com a variação da superfície livre, são transpostos para o levantamento batimétrico vectorizado do estuário, afim de tornar possível a sua cartografia e a definição das respectivas áreas topográficas (em projecção plana), bem como, estimar os volumes líquidos que os representam quando submersos.

5.1.4. Constituintes Harmónicas M_2 e M_4 da Variação da Superfície Livre

Em sistemas estuarinos pouco profundos a propagação da maré não pode ser descrita apenas só em função das principais constituintes astronómicas, mas também em função das sobremarés e/ou das marés compostas que se formam (Hill, 1994). Tendo sido M_2 a componente gravítica dominante da onda de maré e M_4 a principal constituinte de águas pouco profundas a ser formada no interior do estuário do Mondego (Baptista *et al*, 1995), de acordo com Friedrichs &

Aubrey (1988) o quociente entre as respectivas amplitudes (M_4/M_2) pode ser usado como um indicador da magnitude da assimetria sofrida pela maré, enquanto a relação entre as suas fases ($2M_2$-M_4) permitirá descrever o tipo de distorção sofrida.

A aplicação destes dois parâmetros às amplitudes e fases das constituintes harmónicas referentes à variação da superfície livre publicadas por Baptista *el al* (1995) nas cinco estações do estuário, encontram-se expressas no quadro 3.1. A sua análise permitiu realçar para a relação entre as amplitudes, que a distorção da componente vertical da maré foi muito pequena para as estações mais próximas da foz (4 e 5), pelo que terá indiciado uma forma praticamente simétrica, com $(M_4/M_2)_{est,4}$=0.04 e $(M_4/M_2)_{est,5}$=0.03. Para os sectores mais interiores do canal principal do estuário verificou-se ter havido uma tendência de aumento daquela, respectivamente para $(M_4/M_2)_{est,3}$=0.07 e para $(M_4/M_2)_{est,2}$=0.17. O troço de canal estuarino mais interior compreendido entre as estações 1 e 2, foi caracterizado por uma distorção da variação da superfície livre de magnitude elevada, que indiciou ter sido mais ou menos constante entre elas, da ordem dos $(M_4/M_2)_{est,1}$=0.17. Esta magnitude foi representativa de um aumento relativo de M_4 ao longo do canal principal do estuário, tradutor de um incremento da assimetria entre a variação da superfície nas duas fases da maré (Friedrichs & Aubrey, 1988). Quando analisadas as relações de fases ocorridas nas diferentes estações, constatou-se que no braço sul os resultados obtidos de $(2M_2$-$M_4)_{est,5}$=200º apontaram para uma tendência evolutiva de domínio de vazante uma vez terem estado compreendidos no intervalo $180<(2M_2$-$M_3)_\eta<360$ (Friedrichs & Aubrey, 1988; Tonda, 1999). As restantes estações dispostas ao longo do canal principal deste estuário indiciaram um tipo de distorção da superfície livre de domínio da enchente por se terem enquadrado no intervalo $0<(2M_2$-$M_3)_\eta<180$º, uma vez que apresentaram $(2M_2$-$M_3)_{est,4}$=52º, $(2M_2$-$M_4)_{est,3}$=25º, $(2M_2$-$M_4)_{est,2}$=57º e $(2M_2$-$M_4)_{est,1}$=54º.

Subcapítulo 5.2. Análise Fisiográfica do Estuário

A propagação da onda de maré em estuários pouco profundos, pode ser definida como o resultado da interacção não linear dos escoamentos com as características físicas e fisiográficas destes sistemas (Allen, 1997). A variação do atrito de fundo nos canais principais, a amplitude da maré e as descargas fluviais, o seu comprimento, as variações na largura e profundidade, entre outras características geométricas, são responsáveis pela distorção quer da superfície livre, quer da componente horizontal da onda de maré (Chanson, 2004). Sendo as características fisiográficas de muito difícil quantificação, vários autores têm vindo a propor a análise unidimensional de diferentes secções transversais dispostas longitudinalmente a estes sistemas recorrendo a vários parâmetros geométricos, nomeadamente à relação entre a largura e profundidade (Le Floch, 1961 *in* Borrego *et al*, 1995), à relação entre a área e o perímetro molhado (Borrego *et al*, 1995; Tonda, 1999), à forma e inclinação das margens, ao comprimento do estuário, bem como, a razão entre volumes (Aubrey, 1986; Speer *el al*, 1991), permitindo deste modo a análise da distribuição espacial destes parâmetros morfológicos e determinar relações com os impactes na maré.

Tendo exibido a fisiografia um papel primordial na regulação do comportamento da maré no interior do estuário do Mondego, procedeu-se neste subcapítulo ao estudo morfológico, batimétrico e dimensional dos diferentes sectores deste sistema costeiro tendo por base a análise de dois levantamentos batimétricos vectorizados do estuário, representados nas figuras 2.1 e 2.2, complementados com informações provenientes da análise de levantamentos cartográficos locais efectuados durante as actividades de campo. Começou-se por quantificar a importância relativa dos diferentes patamares médios da superfície livre quanto às suas representações volumétrica e cartográfica do estuário, seguida da descrição fisiográfica de diferentes sectores deste sistema com características fisiográficas semelhantes. Para cada um destes sectores definiram-se várias secções transversais ilustrativas dos diferentes troços de canal. Por fim, foram considerados

vários sectores do estuário com características fisiográficas que reproduziram a distribuição espacial dos principais patamares médios e explicaram as principais tendências de variação longitudinal da variação da superfície livre.

5.2.1. Distribuição Espacial dos Ambientes Submareais, Intermareais e Supramareais

Quando projectados os diferentes patamares médios da variação da superfície livre sobre os dois levantamentos cartográficos vectorizados do estuário (figuras 2.1 e 2.2), foi possível determinar a variação espacial e volumétrica dos ambientes submareais permanentes, dos ambientes intermareais, e das zonas supramareais esporadicamente inundadas durante episódios de tempestades e/ou cheias do rio Mondego, antes e depois dos trabalhos de regularização do braço norte, tendo-se obtido os resultados expressos nos quadros 5.2. 1 e 5.2. 2 e representados nas figuras 5.2. 1 e 5.2. 2.

Antes das referidas obras de regularização, foi possível estimar uma área de $A_E \approx 11.8 km^2$ e um volume de $V_E \approx 41.8 \times 10^6 m^3$ para o estuário, representativos de todos os ambientes dos canais principais com cotas inferiores a ≤+4mZH. Por não se ter tido acesso a um levantamento cartográfico de pormenor da Ilha da Murraceira, não se entrou em consideração para esta análise com a área e o volume dos ambientes antropizados desta ilha que foram parcialmente submersos aquando de grandes cheias por parte do Mondego. Desta forma o anterior cálculo de A_E e de V_E pode ter sido subestimado uma vez que as áreas e volumes imersos dos ambientes AS foram determinados por defeito. Contudo, estes ambientes não mensurados localizaram-se preferencialmente acima de cotas ≥+3.4mZH, pelo que a sua interferência na hidrodinâmica estuarina, terá sido muito esporádica e efémera, optando-se por não contabilizar eventuais estimativas espaciais e volumétricas. Com aquela fisiografia, a análise da distribuição espacial dos diferentes ambientes no estuário do Mondego, permitiu verificar que os ambientes permanentemente imersos ocuparam uma área de $A_{ASP,E} \approx 44.9\%$ deste sistema e representaram um volume $V_{ASP,E}$ da ordem dos 29.9%. Estes ambientes localizaram-se preferencialmente na

embocadura, nos sectores médio-distal do braço norte, no sector distal do braço sul e no leito menor da parte estuarina do Canal Regularizado do Baixo Mondego, como se ilustra na figura 5.2. 1 e se descreve nos quadros 5.2. 1 e 5.2. 3. Os ambientes intermareais $A_{AI,E}$ ocuparam praticamente metade da área do estuário com 48.8%, da qual 34.9% foi representada pelos ambientes mais frequentes $A_{AIF,E}$ (compreendidas entre os $+1.2<h_{AIF}\leq+2.8$mZH) e os restantes 13.9% pelas zonas apenas inundadas ou imersas durante as marés vivas, definidas respectivamente por $+2.8<h_{AIES}\leq+3.2$mZH e por $+0.8<h_{AIEI}\leq+1.2$mZH. O volume imerso ocupado pelos ambientes intermareais também foi representativo de metade do volume imerso total do estuário em análise, com 50.7% de $V_{AI,E}$, o qual foi repartido desigualmente pelos ambientes mais frequentes $V_{AIF,E}$ com 32.4% e pelos ambientes apenas condicionados pelas marés vivas $V_{AIE,E}$, com 18.3%. Estes também foram subdivididos em ambientes intermareais naturais, principalmente representados por barras, planícies mareais e por áreas de sapal, que se localizaram apenas no sector proximal do braço norte definindo 9.7% de $V_{AI,E}$ e 7.8% de $A_{AI,E}$, e nos sectores médio-proximal do braço sul com 7.1% de $V_{AI,E}$ e 15.2% de $A_{AI,E}$. As áreas de sapal do estuário ocuparam apenas 8.7% da área deste sistema, da qual 3.9% representaram o alto sapal e 4.8% o baixo sapal. Os ambientes intermareais antropizados foram representados fundamentalmente pelos fundos planos do leito maior do sector distal do Canal Regularizado do Baixo Mondego, definindo cerca de 20% da área do estuário. As margens antropizadas dos canais do estuário correspondentes à embocadura e aos sectores distal do braço sul e médio-distal do braço norte ocuparam apenas ≈0.5% da área total das zonas intermareais do estuário, enquanto as do leito menor e maior a montante dos Cinco Irmãos, definiram cerca de 4.9%. O volume ocupado pelos ambientes intermareais $V_{AI,E}$ foi representativo de metade do volume total do estuário em análise, com 50.7%, o qual foi repartido desigualmente por 32.4% para $V_{AIF,E}$ e por 18.3% para $V_{AIE,E}$ (figura 5.2. 1). Os ambientes AS excepcionalmente inundados aquando de cheias ou temporais, definidos por $+3.2<h_{AS}\leq+4.0$mZH representaram cerca de 19.4% do volume

total deste sistema costeiro, não tendo sido possível contabilizar as áreas correspondentes à ilha da Murraceira. Estes ambientes também definiram relativamente aos ambientes influenciados pela maré, um acréscimo de área de apenas 6.3%, como se ilustra na figura 5.2. 1 e se descreve no quadro 5.2. 1.

Feita uma análise comparativa da variação da superfície livre nos dois canais mais importantes do estuário, foi possível identificar diferenças consideráveis quer na distribuição espacial, quer na importância relativa dos diferentes ambientes em análise. Verificou-se que o braço sul (BS) apenas definiu uma área de 22.5% e um volume de ≈17.8%, enquanto o canal principal (CP) representou a restante parte deste sistema costeiro, com 82.2% de $V_{CP,E}$ e com 77.5% de $A_{CP,E}$. A importância relativa no braço sul dos diferentes ambientes em análise, foi caracterizada por uma pequena expressão das zonas submareais permanentes que representaram apenas ≈3.5% volume do estuário e que praticamente se restringiu ao sector distal, representando 5.9% da área (quadro 5.2. 1). Os ambientes intermareais dominaram este braço estuarino, definindo 9.9% do volume e 15.4% da área do estuário, tendo-se restringido aos sectores médio-proximal (quadro 5.2. 1 e figura 5.2. 1). As áreas intermareais mais frequentes descreveram a maior parcela do canal com 10.7% enquanto as zonas apenas inundadas ou imersa durante as marés vivas representaram 4.7%. Os ambientes supramareais do braço sul definiram 4.5% do volume do estuário, que praticamente se circunscreveu acima da área dos ambientes intermareais, pois representaram um acréscimo relativo de área de apenas 1.2%.

Comparados os dois braços que circundaram a ilha da Murraceira, concluiu-se que ambos apresentaram áreas praticamente iguais (com $\%A_{BN,E}$≈23.2%), muito embora o braço norte (BN) tenha sido mais profundo ao ter definido um volume imerso V_{BN} superior, que foi da ordem dos 26.1%. Este braço também foi composto por volumes submareais permanentes comparativamente mais elevados (da ordem dos 7.4% de V_E), abrangendo comparativamente uma área igualmente superior com 14.5% (quadro 5.2. 1). Também descreveu maiores volumes

intermareais, que foram da ordem dos 14.1% mas que se restringiram a uma área comparativamente menor, que representou 8.1% de A_E (dado que $\%A_{BS,AI,E}\approx5.9\%$ e $\%V_{BS,AI,E}\approx3.5\%$). Ambos os braços apresentaram ambientes supramareais com volumes muito semelhantes, uma vez que $\%V_{AS,BN,E}\approx4.6\%$ e $\%V_{AS,BS,E}\approx4.5\%$. Em ambos os braços os ambientes intermareais circunscreveram-se ao sector proximal, com excepção do braço sul que também abrangeu o seu sector médio. As áreas de sapal também foram repartidas desigualmente pelos dois canais mais importantes deste sistema, com 6.8% no braço sul e 1.9% para o sector proximal do braço norte (figura 5.2. 1).

Quadro 5.2. 1. Importâncias relativas das áreas e dos volumes ocupados pelos diferentes ambientes definidos pela variação da superfície, nos diferentes sectores fisiográficos do estuário do Mondego, antes dos trabalhos de regularização do braço norte. A sombreado realçam-se os tipos de ambientes que dominam os diferentes sectores fisiográficos.

Patamares médios da superfície livre	Canal Principal do estuário (**CP**)						braço sul (**BS**)			Todo o estuário (**E**)
	embocadura (**emb**)		braço norte (**BN**)			Canal Reg. Baixo Mondego(**CRBM**)				
	Sector distal	Sector proximal	Sector distal	Sector médio	Sector proximal	Sectores distal+proximal	Sector distal	Sector médio	Sector proximal	
Amb. supramareais ($3.2<\mathbf{AS}_E\leq4$mZH)	0.06%(A) 0.52%(V)	0.01%(A) 0.17%(V)	0.22%(A) 0.69%(V)	0.01%(A) 0.06%(V)	0.48%(A) 3.31%(V)	4.30%(A) 9.69%(V)	0.01%(A) 0.43%(V)	0.14%(A) 1.76%(V)	1.03%(A) 1.91%(V)	A≈748138m^2(6.3%) V≈8127275m^3(19.4%)
Amb. intermareais ($0.8\leq\mathbf{AI}_E\leq3.2$mZH)	0.47%(A) 1.67%(V)	0.04%(A) 0.57%(V)	0.11%(A) 2.31%(V)	0.14%(A) 2.08%(V)	7.75%(A) 9.70%(V)	24.92%(A) 24.48%(V)	0.13%(A) 1.49%(V)	6.82%(A) 4.09%(V)	8.36%(A) 3.04%(V)	A≈5780267m^2(48.8%) V≈21197625m^3(50.7%)
Amb. submareais ($\mathbf{ASP}_E<0.8$mZH)	2.09%(A) 2.35%(V)	0.77%(A) 1.43%(V)	3.16%(A) 3.78%(V)	2.83%(A) 1.16%(V)	8.47%(A) 2.43%(V)	21.58%(A) 15.22%(V)	2.00%(A) 1.10%(V)	1.87%(A) 0.38%(V)	0.33%(A) 0.03%(V)	A≈5313384m^2(44.9%) V≈12511696m^3(29.9%)
Total	2.62%(A) 4.53%(V)	0.82%(A) 2.17%(V)	3.50%(A) 6.78%(V)	2.98%(A) 3.84%(V)	16.69%(A) 15.44%(V)	50.79%(A) 49.39%(V)	2.14%(A) 3.02%(V)	8.83%(A) 6.23%(V)	9.72%(A) 4.98%(V)	A≈11841789m^2(100%) V≈41836593m^3(100%)

No levantamento batimétrico de 1995 (figura 2.2) todo o braço norte já tinha sofrido trabalhos de dragagem, mas apenas o sector proximal ostentava a fisiografia definitiva projectada para este braço. Este novo traçado era conforme e apresentava-se no seguimento longitudinal do troço Regularizado do Baixo Mondego (CRBM), definido igualmente por uma secção do tipo trapezoidal composta, com um leito menor e um maior (Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos, 1995). Com esta nova fisiografia os ambientes sempre imersos do braço norte passaram a dispor-se longitudinalmente de uma forma mais rectilínea e a definir um canal desprovido de obstáculos naturais[1], mais profundo, com uma batimetria muito regular, de acordo com a figura 5.2. 2 e quadros 2.2 e 5.2. 4. Esta alteração fisiográfica do braço

[1]. Passou a estar desprovido de barras intermareais longitudinais ao canal principal e de outras macroformas de fundo, bom como, de zonas de sapal.

norte traduziu-se num aumento do volume do estuário em $\approx 3.8 \times 10^5 m^3$, passando este a ser representado por um volume $V_E \approx 42.2 \times 10^6 m^3$, reflectindo-se simultaneamente em aumentos relativos quer nos volumes imersos dos ambientes submareais ASP_{BN}, quer dos ambientes intermareais AI_{BN}. A área do estuário permaneceu praticamente invariável continuando a ser definida por $A_E \approx 11.8 km^2$ (quadro 5.2. 2). Desta forma, os ambientes submareais permanentes passaram a abranger uma área de cerca de 42.1% e a definir ≈32% do volume do estuário, e a representar relativamente à fisiografia precedente, um decréscimo da percentagem da área destes ambientes no sistema, bem como, um aumento relativo da proporção dos volumes líquidos dos ambientes sempre imersos. Estes novos valores dos ambientes ASP_E relacionaram-se fundamentalmente com a regularização do braço norte, que foi responsável pela delimitação das áreas submareais permanentes ao leito menor, tanto que os ambientes submareais nos restantes troços fisiográficos do estuário continuaram a apresentar praticamente as mesmas importâncias relativas, como se ilustra no quadro 5.2. 2. Analisando apenas o troço proximal daquele canal (por já se encontrar completamente regularizado) constatou-se que a redução ocorrida nas áreas dos ambientes ASP_E foi da ordem dos $2.9 \times 10^5 m^2$, representativa de um decréscimo da área da ordem dos 15% para este troço do braço norte. O aumento dos volumes líquidos dos ambientes submareais permanentes registado neste troço de canal foi da ordem dos $2.9 \times 10^5 m^3$, e representativo de um aumento da ordem dos ≈12% para este troço estuarino. Estando os ambientes submareais permanentes confinados ao leito menor deste braço, representado por um canal estreito, pouco profundo, com secção trapezoidal e desprovido longitudinalmente de obstáculos naturais de grande dimensão (quadro 5.2. 4), o atrito de fundo terá tido um papel primordial na distorção dos escoamentos sobretudo aquando das fases de menor altura de água. Comparativamente à anterior fisiografia, a regularização do braço norte terá sido favorável a uma redução da distorção nos escoamentos causada pelo atrito de fundo, em resultado do nivelamento longitudinal batimétrico introduzido, bem como, pela maior altura da coluna de

água que passou a apresentar, propiciando desta forma a entrada da maré ao longo do canal principal do estuário (Duarte & Reis, 1994).

Os ambientes intermareais do estuário com esta nova fisiografia passaram a abranger uma área de $6.1x10^6m^2$ e a representar um volume de $\approx 20.6x10^6m^3$, definindo respectivamente 51.3%A_E e 48.8%V_E deste sistema costeiro. Relativamente à anterior fisiografia descreveram um aumento relativo na sua distribuição espacial e um decréscimo relativo do seu volume, que foi da ordem dos $2.9x10^5m^2$ e dos $6.2x10^5m^3$, respectivamente. Destes ambientes, os intermareais mais frequentes (AIF_E) e os ambientes condicionados apenas pelas marés vivas (AIE_E) definiram respectivamente cerca de 31.3% e 17.5%, e representaram 38% e 13.3% da área do estuário. Com estes trabalhos de regularização já concluídos no sector proximal do braço norte, os ambientes intermareais neste canal passaram a ser representados fundamentalmente pelos extensos fundos planos do leito maior, praticamente restritos a uma variação de cotas batimétricas compreendidas entre os +1.3 e os +2mZH, que se apresentaram suavemente inclinadas em direcção à foz, como se ilustra nas imagens d) e f) da figura 5.2. 4. Os restantes ambientes intermareais compreendidos entre as cotas $+0.8<AI_{BN}<+1.3$mZh e $+2<AI_{BN}<+3.2$mZH encontraram-se praticamente confinados às estreitas margens dos leitos menor e maior, como se mostra nas imagens a), b) e c) e nas imagens f), g), h), i) e j) da figura 5.2. 4, representando apenas ≈16% da área do sector proximal do braço norte. Analisado apenas o troço proximal deste braço, foi possível verificar que o aumento relativo da área dos ambientes intermareais com esta nova fisiografia foi da ordem dos $2.75x10^5m^2$, expressivo de um aumento da ordem dos 15% relativamente ao anterior traçado, mas praticamente representativo de uma pequena variação de cotas (+1.3 a +2mZH). A análise volumétrica destes ambientes reflectiu uma redução da ordem dos $5.5x10^5m^3$ com esta secção trapezoidal composta, tendo representado apenas 8% do volume total deste sector estuarino. Para além da eliminação de grandes barras

intermareais longitudinais e transversais ao braço norte e de zonas de sapal[2], estas obras de regularização foram responsáveis, por um aumento e nivelamento da batimetria em todo o canal, passando este também a apresentar um traçado mais rectilíneo e uma secção transversal geométrica. Causaram também um aumento relativo de áreas intermareais que se restringiram a uma pequena variação de cotas batimétricas, ficando os restantes níveis intermareais praticamente representados por estreitas faixas nas margens dos leitos menor e maior deste canal. Desta forma, os ambientes intermareais deixaram de constituir obstáculos naturais significativos à propagação dos escoamentos, passando a gerar retardamentos nos escoamentos fundamentalmente associados à rugosidade das partículas e às pequenas estruturas sedimentares de fundo no leito maior, nas fases de menor altura de água (Dyer, 1986; Stacey, 1996). Os ambientes supramareais AS do estuário não sofreram alterações volumétricas e de área significativas com a regularização do braço norte (quadros 5.2. 1 e 5.2. 2).

Quadro 5.2. 2. Importâncias relativas das áreas e dos volumes ocupados pelos diferentes ambientes relacionados com a variação da superfície, nos diferentes sectores fisiográficos do estuário do Mondego, durante os trabalhos de regularização do braço norte. Estes resultados referem-se ao levantamento batimétrico de 1995 realizado pela Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos. A sombreado realçam-se os tipos de ambientes que dominam os vários sectores fisiográficos. O símbolo (*) representou os troços de canal que sofreram trabalhos de dragagem, precedentes ao novo traçado regularizado.

Patamares médios da superfície livre	Canal Principal do estuário (**CP**)					braço sul (**BS**)			Todo o estuário (**E**)
	embocadura (**emb**)		braço norte (**BN**)		Canal Reg. Baixo Mondego(**CRBM**)				
	Sector Distal (*)	Sector Proximal (*)	Sectores médio-distal (*)	Sector proximal	Sectores distal+proximal	Sector distal	Sector médio	Sector proximal	
Amb. supramareais (3.2<**AS**$_E$≤4mZH)	0.07%(A) 0.48%(V)	0.01%(A) 0.16%(V)	0.03%(A) 1.23%(V)	0.68%(A) 3.27%(V)	4.30%(A) 9.60%(V)	0.01%(A) 0.43%(V)	0.14%(A) 1.74%(V)	1.03%(A) 1.98%(V)	A≈777701m^2(6.6%) V≈8111023m^3(19.2%)
Amb. intermareais (0.8≤**AI**$_E$≤3.2mZH)	0.43%(A) 1.56%(V)	0.03%(A) 0.55%(V)	0.40%(A) 4.50%(V)	10.80%(A) 8.30%(V)	24.93%(A) 24.30%(V)	0.13%(A) 1.47%(V)	6.82%(A) 4.05%(V)	8.37%(A) 3.02%(V)	A≈6072599m^2(51.3%) V≈20579465m^3(48.8%)
Amb. submareais (**ASP**$_E$<0.8mZH)	1.99%(A) 2.34%(V)	0.76%(A) 1.39%(V)	5.78%(A) 5.42%(V)	6.01%(A) 4.31%(V)	21.59%(A) 15.09%(V)	2.00%(A) 1.09%(V)	1.87%(A) 0.38%(V)	0.33%(A) 0.03%(V)	A≈4983069m^2(42.1%) V≈13525412m^3(32.0%)
Total	2.48%(A) 4.38%(V)	0.80%(A) 2.10%(V)	6.22%(A) 10.96%(V)	16.77%(A) 15.88%(V)	50.83%(A) 48.95%(V)	2.14%(A) 2.99%(V)	8.84%(A) 6.17%(V)	9.72%(A) 4.94%(V)	A≈11833369m^2(100%) V≈42215901m^3(100%)

[2]. Entre outros ambientes intermareais naturais.

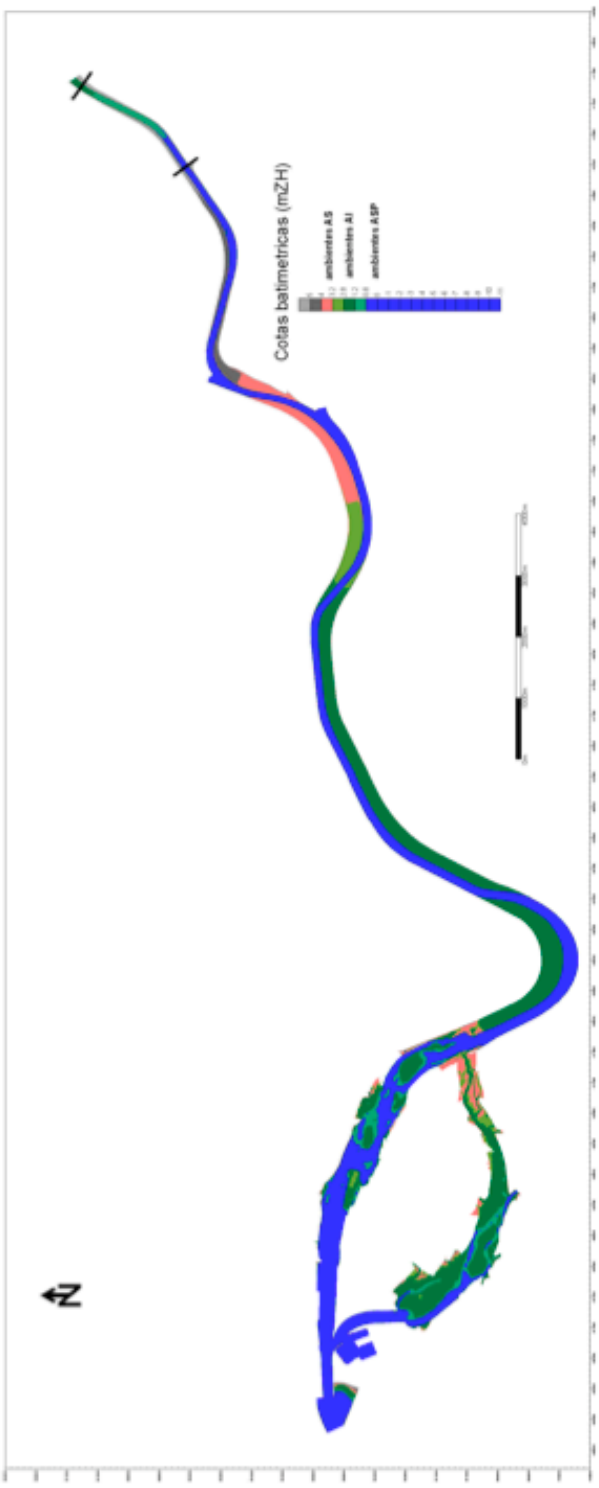


Figura 5.2. 1. Distribuição espacial dos diferentes ambientes definidos pela variação da superfície livre no estuário do Mondego, antes dos trabalhos de regularização do braço norte. Para os ambientes localizados abaixo do patamar médio $h_{x,y}$<+0.8mZH foram definidos os ambientes permanentemente imersos (ASP), para as zonas compreendidas entre os +0.8≤$h_{x,y}$<+1.2mZH foram cartografados os ambientes esporadicamente emersos apenas durante as marés vivas (AIEI). Os ambientes intermareais mais frequentes (AIF) foram definidos para +1.2≤$h_{x,y}$≤+2.8mZH, enquanto os ambientes esporadicamente imersos apenas durante as marés vivas (AIES) para +2.8<$h_{x,y}$≤+3.2mZH. Os locais do estuário inundados apenas durante quadros de marés de maior amplitude associados ou a sobre-elevação do nível do mar por fenómeno atmosféricos e/ou a grandes cheias do Mondego (AS), foram definidos para níveis compreendidos entre +3.2≤$h_{x,y}$≤+4.0mZH. (Este mapa é impresso em tamanho A3).

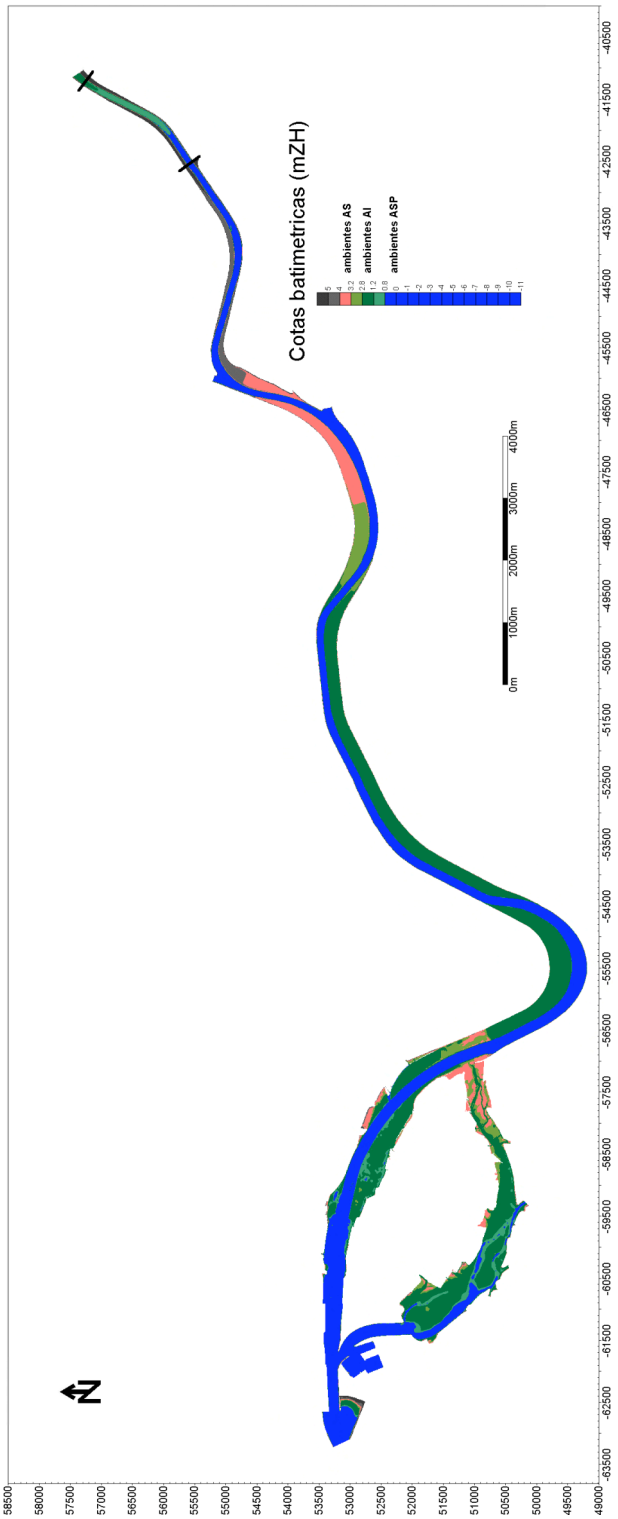


Figura 5.2. 2. Distribuição espacial dos diferentes ambientes definidos pela variação da superfície livre no estuário do Mondego, em 1995 durante os trabalhos de regularização do braço norte. Para os ambientes localizados abaixo do patamar médio $h_{x,y}$<+0.8mZH foram definidos os ambientes permanentemente imersos (ASP), para as zonas compreendidas entre os +0.8≤$h_{x,y}$<+1.2mZH foram cartografados os ambientes esporadicamente emersos apenas durante as marés vivas (AIEI). Os ambientes intermareais mais frequentes (AIF) foram definidos para +1.2≤$h_{x,y}$≤+2.8mZH, enquanto os ambientes esporadicamente imersos apenas durante as marés vivas (AIES) para +2.8<$h_{x,y}$≤+3.2mZH. Os locais do estuário inundados apenas durante quadros de marés de maior amplitude associados ou a sobre-elevação do nível do mar por fenómeno atmosféricos e/ou a grandes cheias do Mondego (AS), foram definidos para níveis compreendidos entre +3.2<$h_{x,y}$≤+4.0mZH. (Este mapa é impresso em tamanho A3).

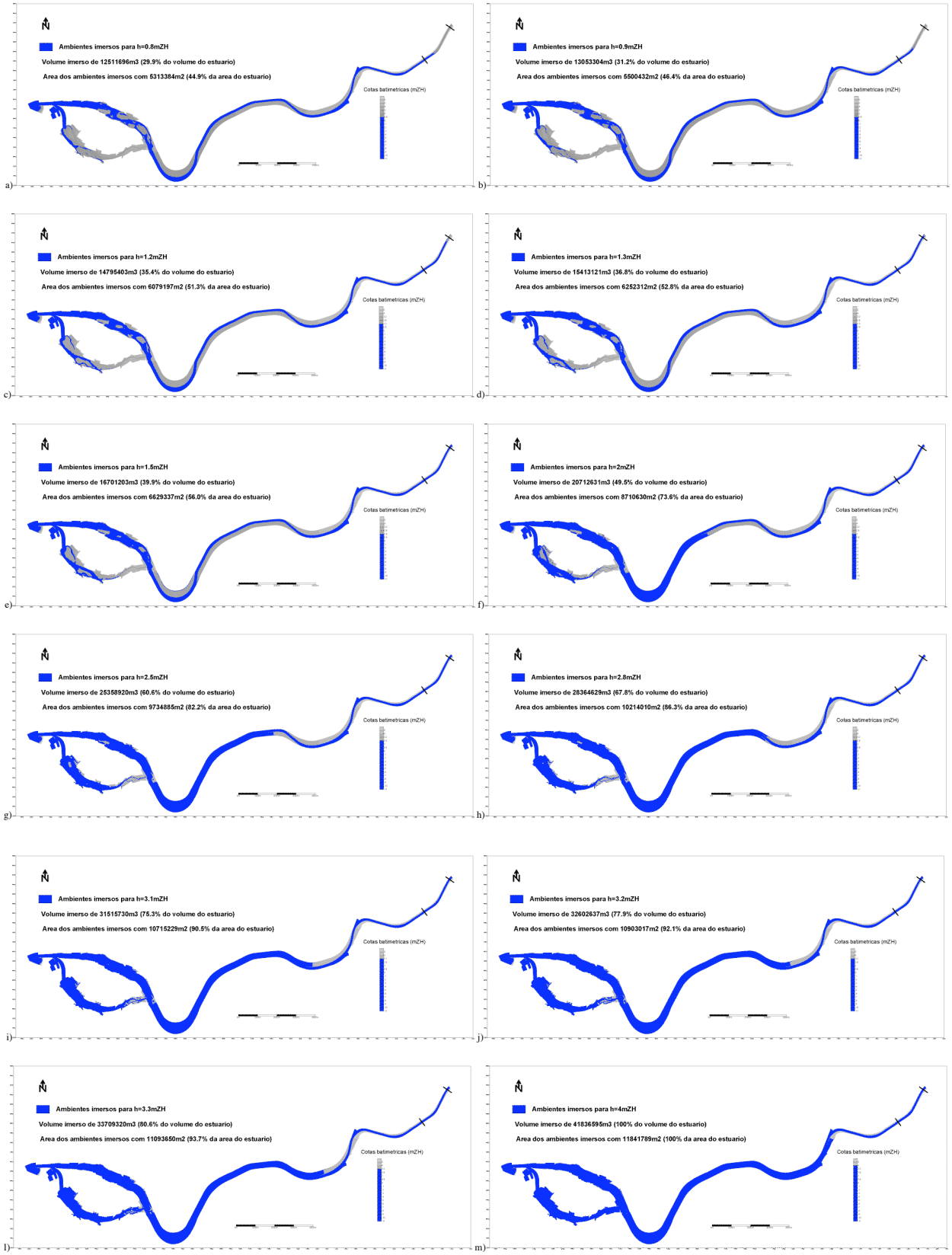


Figura 5.2. 3. Distribuição espacial dos ambientes imersos para os diferentes patamares médios da superfície livre, antes das obras de regularização do braço norte, em 1991. Disposição espacial para os patamares médios para: $h_{x,y} \leq +0.8$mZH mapa a), $h_{x,y} \leq +0.9$mZH mapa b), $h_{x,y} \leq +1.2$mZH mapa c), $h_{x,y} \leq +1.3$mZH mapa d), $h_{x,y} \leq +1.5$mZH mapa e), $h_{x,y} \leq +2.0$mZH mapa f), $h_{x,y} \leq +2.5$mZH mapa g), $h_{x,y} \leq +2.8$mZH mapa h), $h_{x,y} \leq +3.1$mZH mapa i), $h_{x,y} \leq +3.2$mZH mapa j), $h_{x,y} \leq +3.3$mZH mapa l), $h_{x,y} \leq +4$mZH mapa m). (Esta figura é impressa em tamanho A3).

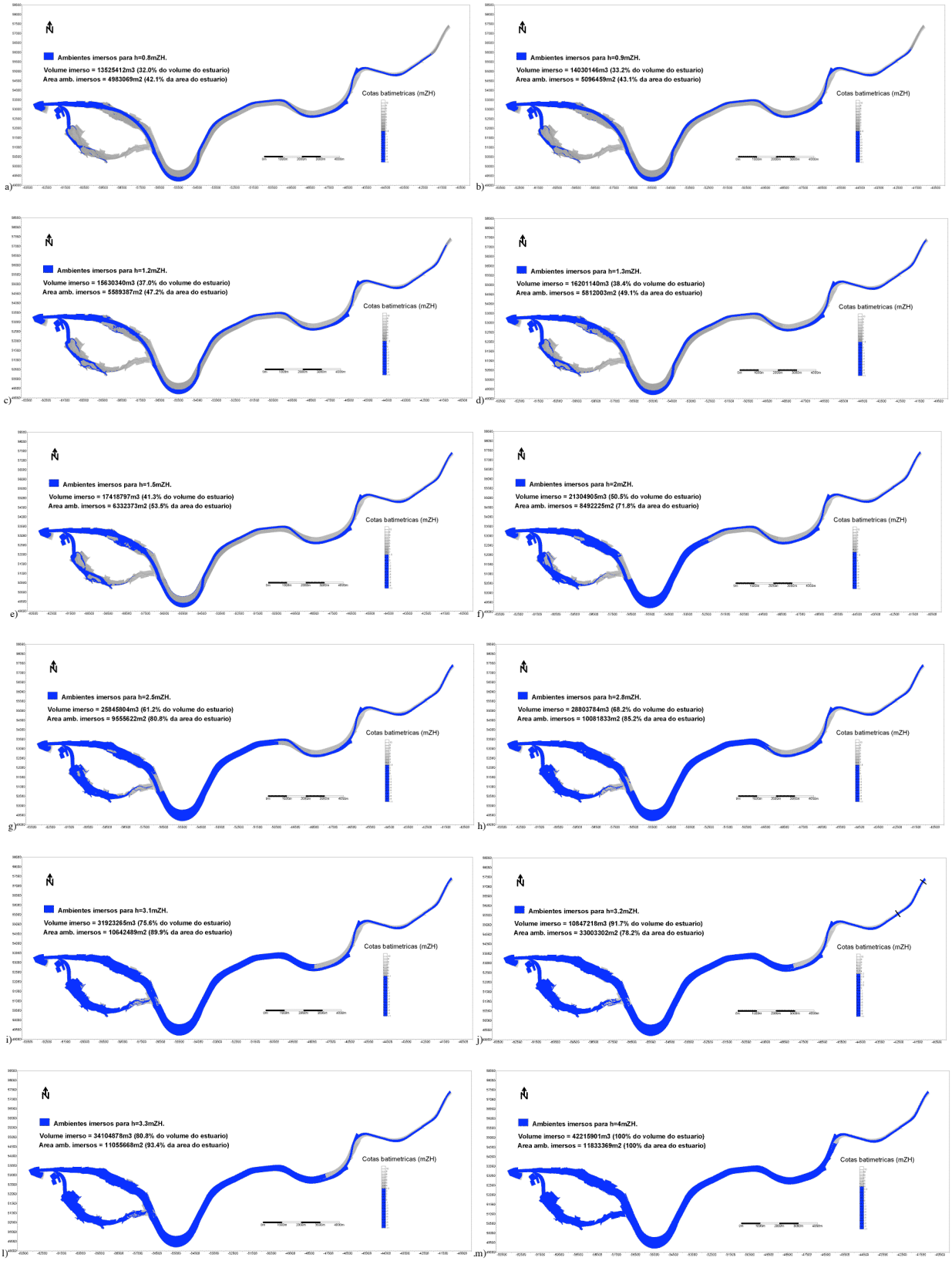


Figura 5.2. 4. Distribuição espacial dos ambientes imersos para os diferentes patamares médios da superfície livre, com base no levantamento batimétrico de 1995. Disposição espacial para os patamares médios para: $h_{x,y} \leq +0.8$mZH mapa a), $h_{x,y} \leq +0.9$mZH mapa b), $h_{x,y} \leq +1.2$mZH mapa c), $h_{x,y} \leq +1.3$mZH mapa d), $h_{x,y} \leq +1.5$mZH mapa e), $h_{x,y} \leq +2.0$mZH mapa f), $h_{x,y} \leq +2.5$mZH mapa g), $h_{x,y} \leq +2.8$mZH mapa h), $h_{x,y} \leq +3.1$mZH mapa i), $h_{x,y} \leq +3.2$mZH mapa j), $h_{x,y} \leq +3.3$mZH mapa l), $h_{x,y} \leq +4$mZH mapa m). (Esta figura é impressa em tamanho A3).

A regularização da confluência proximal do braço sul com o braço norte, foi apoiada quer na colocação de várias manilhas cilíndricas na extremidade posterior do primeiro canal, quer na construção de uma soleira de fixação de enrocamento no prolongamento da margem esquerda do CRBM a demarcar as áreas de influência dos dois braços (figura 5.2. 2), foi responsável pela redução da secção molhada dos locais por onde se realizavam as trocas líquidas ocorridas entre os dois braços. Desta forma, verificou-se uma considerável redução do volume de água escoado do braço sul para o braço norte durante as fases terminais da enchente, com especial relevo durante as marés vivas. Esta alteração fisiográfica promoveu uma redução da recirculação de água no braço sul e consequente aumento dos tempos de residência, associado a uma degradação da qualidade da água neste braço periférico do estuário.

Com esta nova fisiografia, o braço sul passou a representar 22.5% da área e 17.7% do volume do estuário, enquanto o canal principal passou a representar a restante parte, com 77.5%A_E e 82.3%V_E (quadro 5.2. 2). No seio deste canal, a embocadura passa a descrever cerca de 3.3% da área e 6.5% do volume deste sistema costeiro, enquanto o braço norte passa a definir 23% de A_E e 26.9% de V_E. O sector do estuário correspondente ao Canal Regularizado do Baixo Mondego (a montante dos Cinco Irmãos) passa a representar 50% e a abranger 50.8% da área do estuário. Actualmente, apenas 11% da área deste sistema e 9.2% do seu volume não se encontra completamente regularizada com uma fisiografia do tipo secção trapezoidal, encontrando-se confinada aos sectores médio-proximal do braço sul.

Áreas e Volumes Imersos do Estuário

Foram relacionadas as áreas e os volumes dos ambientes imersos determinados para os diferentes patamares médios da superfície livre no estuário, em conformidade com o gráfico da figura 5.2. 5. Neste gráfico também foram projectadas as áreas e volumes dos referidos ambientes, antes e depois dos trabalhos de regularização efectuados no braço norte, afim de se

identificarem quais os principais impactes hidrodinâmicos produzidos no estuário com estas alterações fisiográficas. Analisadas apenas as variações dos volumes (V) em função da superfície livre (η) foi possível definir para o estuário, para o canal principal e para o braço sul, funções do tipo polinomial positivas de grau 2, estatisticamente significativas (eq.5.2. 1), representadas no gráfico da figura 5.2. 5. Com a regularização do braço norte, o estuário e o canal principal passaram a descrever variações dos volumes imersos com magnitudes superiores, representadas pelas funções significativas 5.2. 2 e indicadas na figura 5.2. 5.

$$V_E=1.1*10^6\eta^2+4*10^6\eta+8.5x10^6;\ V_{CP}=7.4*10^5\eta^2+3.8*10^6\eta+7.4x10^6;\ V_{BS}=3.5*10^5\eta^2+2*10^5\eta+1.1x10^6 \quad (5.2.\ 1)$$

$$V_{E,O}=1.2*10^6\eta^2+3.4*10^6\eta+9.9x10^6; \quad V_{CP,O}=8.2*10^5\eta^2+3.2*10^6\eta+8.8x10^6 \quad (5.2.\ 2)$$

Na referida figura, a análise da variação das áreas dos ambientes imersos (A) com a superfície livre, também permitiu descrever tendências de variação directamente proporcionais, definidas por funções matemáticas mais complexas, quando considerado todo o estuário e apenas o canal principal (figura 5.2. 5). Descreveu, contudo uma função do tipo polinomial positiva, significativa quando analisada apenas a variação das áreas dos ambientes imersos no braço sul (equação 5.2. 3).

$$A_{BS}=-1.1*10^5\eta^2+1.2*10^6\eta+2.5x10^5 \quad (5.2.\ 3)$$

Quando comparadas as variações registadas nas áreas e nos volumes dos ambientes imersos do estuário, foi possível verificar que os resultados obtidos foram concordantes entre si, permitindo identificar tendências de variação destas, distintas ao longo da variação da superfície livre, como também, reconhecer comportamentos diferenciados entre os dois canais mais importantes deste sistema costeiro. Considerando que a variação da superfície livre foi regular ao longo do tempo, a análise do gráfico da figura 5.2. 5 permitiu identificar comportamentos distintos na variabilidade das áreas dos ambientes imersos do estuário, que corresponderam aos intervalos compreendidos entre os +0.8mZH e os ≈+1.4mZH, entre os ≈+1.4mZH e os ≈+2mZH, entre os ≈+2mZH e os +3.2mZH e por fim entre as cotas ≈+3.3mZH a +4mZH.

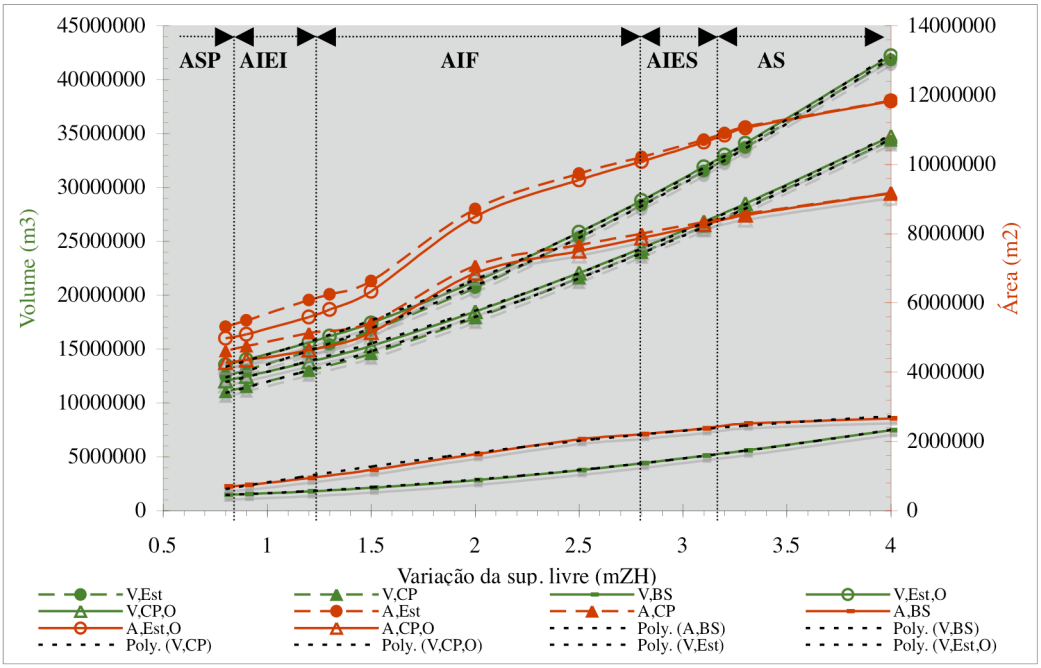


Figura 5.2. 5. Variações das áreas e dos volumes dos ambientes imersos para diferentes níveis da superfície livre (η_z), quer registados em todo o estuário, quer apenas no canal principal, e somente no braço sul. Na legenda, V_{Est}, V_{CP} e V_{BS} simbolizaram respectivamente os volumes imersos aferidos no estuário, no canal principal e apenas no braço sul, enquanto A_{Est}, A_{CP} e A_{BS} representaram as áreas dos ambientes imersos determinados para o estuário, para o canal principal e apenas para o braço sul. No gráfico, ASP figurou os ambientes sempre imersos do estuário, AS os ambientes supramareais inundados apenas durante episódios de cheia e/ou temporal, AIF os ambientes intermareais mais frequentes, e por fim AIEI e AIES simbolizaram respectivamente os ambientes intermareais esporadicamente inundados e emersos durante as marés vivas. Antes das obras de regularização do braço norte, a variação de volumes imersos no estuário seguiu uma distribuição polinomial $V_E=1.1*10^6\eta^2+4*10^6\eta+8.5x10^6$, com $r^2_{E,V,\eta}=0.9998$, $r_{E,V,\eta}=0.9999$, $p<0.01$, $N_E=10$, enquanto o canal principal apresentou $V_{CP}=7.4*10^5\eta^2+3.8*10^6\eta+7.4x10^6$, com $r^2_{CP,V,\eta}=0.9998$, $r_{CP,V,\eta}=0.9999$, $p<0.01$, $N_{CP}=10$. Com as obras de regularização em curso, passou-se a ter $V_{E,O}=1.2*10^6\eta^2+3.4*10^6\eta+9.9x10^6$, com $r^2_{E,V,\eta,O}=0.9998$, $r_{E,V,\eta,O}=0.9999$, $p<0.01$, $N_E=10$ para o estuário, e $V_{CP,O}=8.2*10^5\eta^2+3.2*10^6\eta+8.8x10^6$, com $r^2_{CP,V,\eta,O}=0.9998$, $r_{CP,V,\eta,O}=0.9999$, $p<0.01$, $N_{CP}=10$ para o canal principal. Para o braço sul a variação dos volumes imersos foi definida por $V_{BS}=3.5*10^5\eta^2+2*10^5\eta+1.1x10^6$, com $r^2_{E,V,\eta}=0.9998$, $r_{E,V,\eta}=0.9999$, $p<0.01$, $N_{BS}=10$. Neste braço a variação das áreas imersas foi definida por $A_{BS}=-1.1*10^5\eta^2+1.2*10^6\eta+2.5x10^5$, com $r^2_{E,A,\eta}=0.994$, $r_{E,A,\eta}=0.997$, $p<0.01$, $N_{BS}=10$. Estas variáveis foram consideradas independentes uma vez que $1\leq t_{D\text{-}W}\leq 3$.

Para variações da superfície livre compreendidas entre os $0.8\leq\eta_{x,y,E}<1.4$mZH registaram-se tendências de variação do tipo lineares nas áreas e volumes dos ambientes imersos do estuário, que caracterizaram os ambientes intermareais esporadicamente emersos durante as marés vivas. Estes encontraram-se confinados maioritariamente pelos troços dos canais que compõem o estuário definidos por uma secção trapezoidal[3] ou pelo leito menor[4], como se ilustra

[3]. Representado pelo sector portuário do estuário.
[4]. Que passou a ser representado pelo braço norte e pelo canal estuarino regularizado do Baixo Mondego, localizado a montante dos Circo Irmãos.

nos mapas a) a d) da figura 5.2. 4. Antes e depois da regularização do braço norte, as tendências de variação definidas pelas respectivas áreas e volumes foram muito semelhantes entre si, com a particularidade de terem sido responsáveis por um decréscimo relativo nas áreas e por um aumento relativo nos volumes destes ambientes. Esta variação da superfície livre com a regularização do braço norte foi representativa de um volume aproximado de $3.27x10^6m^3$ (equivalente a 8% de V_E), abrangente de uma área de $\approx 4.10x10^6m^2$ que simbolizou 9% da área do estuário (figura 5.2. 5).

O segundo intervalo considerado, simbolizado na figura 5.2. 5 por $+1.4<\eta_{x,y,E}<+2mZH$, passou a definir variações de maior magnitude dos volumes e das áreas inundadas, quando comparadas com as distribuições definidas anteriormente. O volume e a área envolvidas por estas variações foram da ordem dos $4.51x10^6m^3$ e dos $2.41x10^6m^2$ representando respectivamente ≈11% e 20% do estuário. Representaram a inundação de uma parte significativa das vastas planícies intermareais definidas pelos fundos do leito maior do canal principal do estuário praticamente confinadas as estas cotas, abrangendo parte dos ambientes intermareais frequentes, como se representa nos mapas e) e f) da figura 5.2. 4. A inundação destas vastas planícies intermareais terá sido acompanhada de um abrandamento da componente horizontal da maré em resultado dos fenómenos de amortecimento gerados pelo fundo nos escoamentos de enchente, mas também por um ligeiro abrandamento na subida da superfície livre (Speer & Aubrey, 1985; Blanton & Andrade, 2001). Na fase inicial da vazante, aquelas áreas também terão sido responsáveis por um abrandamento da velocidade dos escoamentos relativamente à parte central do canal, retardando a saída da água.

Para variações da superfície livre compreendidas entre os $+2<\eta_{x,y,E}<+3.2mZH$ passou-se a registar uma variação das áreas dos ambientes imersos no estuário distinta, definida por um decréscimo relativo das suas magnitudes quando comparada com a variação registada na variação do nível da água precedente (figura 5.2. 5). Quando coligada com o registo de um

aumento relativo na variação dos volumes, levou a admitir que este incremento no volume de água para o interior do estuário, por exemplo nas fases da enchente, possa ter estado associado a um incremento da cinética dos escoamentos e justificar a ocorrência nesta fase das velocidades máximas da enchente. A análise da variação da área dos ambientes imersos neste intervalo da variação da superfície livre, permitiu constatar que apresentou um comportamento muito semelhante ao registado no intervalo $+0.8 \leq \eta_{x,y,E} < +1.4$mZH, tanto que também reproduziu a inundação da parte trapezoidal da secção transversal, só que desta vez correspondente ao leito maior do canal principal, que representou 67.6% da área total do estuário nesta fase dos trabalhos de regularização, em 1995. Findos estes, o canal regularizado com este tipo de secção trapezoidal composta, passou a ocupar cerca de 73.8% de A_E (quadro 5.2. 2). Esta variação da superfície livre englobou os ambientes intermareais localizados acima do nível médio da maré, ou seja abrangeu a metade superior dos ambientes AIF e os ambientes AIEI, representando volumes na ordem dos $11.7 \times 10^6 m^3$ e uma área de $\approx 2.35 \times 10^6 m^2$ que simbolizaram respectivamente ≈28% e 20% do estuário.

Para o nível mais elevado compreendido entre os $3.2 < \eta_{x,y,E} \leq 4$mZH, abrangente dos ambientes esporadicamente inundados AS localizados acima da zona de influência da maré, registou-se uma alteração no padrão de variação das áreas e dos volumes (figura 5.2. 5). Esta alteração, traduziu apenas variações claramente subestimadas destes parâmetros, uma vez não terem entrado em consideração com os ambientes imersos aquando de cheias e/ temporais da ilha da Murraceira.

Quando analisadas as variações das áreas e dos volumes dos ambientes imersos nos dois canais importantes do estuário, expressas na figura 5.2. 5, apurou-se que apresentaram comportamentos distintos principalmente relacionados com as diferenças fisiográficas apresentadas entre si. O canal principal apresentou uma fisiografia praticamente regularizada, com uma variação longitudinal e transversal da batimetria muito nivelada. Foi dominada quer

por um leito de estiagem de secção trapezoidal representativa dos ambientes submareais, quer por vastas planícies de inundação correspondentes ao fundo do leito maior, confinadas a uma pequena gama de cotas batimétricas intermareais. A fisiografia trapezoidal do primeiro leito foi responsável pela variação quase linear quer da área, quer do volume dos ambientes imersos para variações da superfície livre compreendidas entre as cotas +0.8 e os +1.4mZH (ver figura 5.2. 5 e mapas a) a d) da figura 5.2. 4). A inundação das planícies correspondentes aos fundos do leito maior, que se encontraram compreendidas entre as cotas ≈+1.4 e os +2mZH e ocuparam cerca de 22% da área do estuário, foram responsáveis pelo aumento relativo da variação das áreas e dos volumes dos ambientes imersos ocorridos entre estas notas intermareais (figura 5.2. 5 e mapas e) e f) da figura 5.2. 4). A inundação dos ambientes compreendidos entre os +2.0 e os +3.2mZH no CP voltou a definir variações de área e volume semelhantes às registadas no intervalo $+0.8 \leq \eta_{x,y,E} < 1.4$mZH, por ter correspondido à inundação dos ambientes intermareais representados pelas estreitas margens artificiais da secção trapezoidal do leito maior (ver figura 5.2. 5 e mapas g) a j) da figura 5.2. 4). O braço sul, apresentou uma disposição marginal ao canal principal. O seu sector distal definiu uma morfologia semelhante à da restante zona portuária, menos profunda, mas que foi contrastante com a fisiografia dos sectores médio-distal que se apresentaram pouco antropizados e dominados por ambientes intermareais (figuras 5.2. 1 e 5.2. 2). Estes ambientes foram representados por grandes estruturas de fundo naturais que ocuparam apenas ≈15% da área do estuário, mas que também definiram todo o leque de variação de cotas batimétricas na zona entremarés.

A análise da figura 5.2. 5 também permitiu verificar que as regressões representativas das variações dos volumes e das áreas dos ambientes imersos do estuário foram fundamentalmente condicionadas pelas variações dos volumes e das áreas dos ambientes localizados no canal principal, em aproximadamente 82% e 77% respectivamente, enquanto o braço sul terá contribuído com apenas 18% e 23% (quadro 5.2. 2). Estas considerações foram igualmente

corroboradas pela semelhança morfológica observada entre as regressões $A_{E,\eta}$ com $A_{CP,\eta}$ e entre as regressões $V_{E,\eta}$ com $V_{CP,\eta}$.

Esta nova fisiografia do estuário para além de ter sido responsável por alterar o volume de água necessário para inundar o canal principal, também favoreceu a entrada da maré e reduziu os anteriores atrasos sofridos pelas preia-mares através da redução dos volumes intermareais e da eliminação das áreas de sapal e barras intermareais (Aubrey, 1986; Speer *el al*, 1991).

5.2.2. Análise Dimensional do Estuário

Dada a dificuldade em traduzir matematicamente a contribuição que a fisiografia apresenta na distorção da onda de maré, torna-se frequentemente recorrer à análise de vários parâmetros geométricos que caracterizam as variações morfológicas e batimétricas espaciais no estuário.

5.2.2.1 Dimensões Médias do Estuário

O estuário do Mondego apresentou um comprimento longitudinal máximo de $L_{E,max,MM}\approx$25.9km e de $L_{E,max,MV}\approx$28.5km, respectivamente aquando de marés mortas e vivas, sob baixos regimes do Mondego. Duarte & Reis (1993) e Duarte (1994) definiram o primeiro alcance máximo como tendo correspondido à distância longitudinal medida ao longo do canal principal compreendida entre o alinhamento das duas cabeças dos molhes exteriores da embocadura e o alcance máximo da maré dinâmica, que coincidiu com o açude transversal[5] ao CRBM localizado a ≈400m a montante da ponte da Granja[6], como se representa na figura 5.2. 1. Para marés de maior amplitude, a variação da superfície livre ultrapassa a parte superior do referido açude (de cota média ≈+2.7mZH), progredindo para montante deste, até que a onda de

[5]. Designado em Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (1976) por soleira de fixação do fundo do leito menor sem desnível.
[6]. Também posicionado no CRBM imediatamente a montante da confluência do rio Ega.

maré é totalmente refractada no açude transversal ao canal localizado a 400m a montante da ponte de Formoselha. Sob regimes fluviais pelo menos superiores a $37m^3/s$ por parte do Mondego, o alcance máximo da maré dinâmica para montante no CRBM começa a retroceder para posições não mensuradas durante as actividades de campo, uma vez ter-se dado preferência à medição das oscilações ocorridas no alcance máximo da maré salina, para os diferentes quadros hidrodinâmicos estudados.

Tendo por referencia o nível médio das água no estuário (≈+2mZH), foi determinado para este sistema costeiro uma profundidade e uma largura médias de $\bar{h}_{E,O} = \bar{h}_{E,NMM,O} \approx 2.5m$ e de $\bar{b}_{E,O} \approx 260m$, respectivamente. Antes dos trabalhos de regularização do braço norte, em 1991, a profundidade média do estuário era pouco inferior, na ordem dos $\bar{h}_E \approx 2.4m$ e apresentava a mesma largura ($\bar{b}_E \approx 266m$). Quando analisado apenas o nível correspondente às preia-mares médias (PMM≈3.1mZH), verificou-se que a profundidade média do estuário aumentou para magnitudes da ordem dos $\bar{h}_{E,PMM,O} \approx 2.9m$ e a sua largura estendeu-se para os $\bar{b}_{E,PMM,O} \approx 308m$. Contudo, quando determinadas as dimensões médias do estuário para o nível correspondente às baixa-mares médias (BMM≈1.2mZH), obteve-se uma largura de $\bar{b}_{E,BMM,O} \approx 171m$, que representou um decréscimo relativamente a $\bar{b}_{E,O}$ e por sua vez a $\bar{b}_{E,PMM,O}$. O mesmo tipo de relação também foi registado antes das referidas obras de regularização, uma vez $\bar{b}_{E,PMM} \approx 312m$ e $\bar{b}_{E,BMM} \approx 186m$. Analisada a batimetria, verificou-se que o valor obtido foi de $\bar{h}_{E,BMM,O} \approx 2.8m$ e que representou comparativamente a $\bar{h}_{E,PMM,O}$ um decréscimo de apenas ≈0.1m e relativamente ao nível médio da maré uma batimetria média superior, na ordem dos $[(\bar{h}_{E,BMM,O}) - (\bar{h}_{E,NMM,O})] \approx 0.3m$. Uma vez que a profundidade média do estuário foi determinada através do quociente entre o volume imerso e a área da superfície da água, estes últimos resultados reflectiram quer o efeito geométrico desempenhado pelos extensos fundos planos do leito maior

ao estarem enquadrados em cotas adjacentes ao NMM e localizados imediatamente acima do leito menor (canal profundo, estreito, com batimetria longitudinalmente nivelada), quer de uma forma indirecta antever quais os principais impactes hidrodinâmicos resultantes desta regularização. Antes das obras realizadas no braço norte, a profundidade deste sistema costeiro era definida por uma maior amplitude de variação, definida apartir de $\overline{h}_{E,BMM} \approx 2.4m$ e de $\overline{h}_{E,PMM} \approx 2.8m$. Com o exposto, o estuário do Mondego pode ser considerado um sistema costeiro de reduzidas dimensões e pouco profundo. Por ter apresentado um comprimento muito superior à sua largura média, e esta última ter sido muito superior à sua profundidade média, permitiu que fosse considerada unidimensional a sua configuração.

Quadro 5.2. 3. Características morfológicas, batimétricas e estruturais similares apresentadas pelos diferentes sectores do estuário, antes das obras de regularização do braço norte. Definição das importâncias relativas dos diferentes ambientes em estudo em cada sector fisiográfico. A profundidade média e a largura dos canais foram determinados para o nível médio das águas do mar, para +2mZH. A análise espacial e volumétrica percentual determinada para os diferentes ambientes referiu-se a cada sector fisiográfico em análise.

Troços de canal	Sectores	Descrição fisiográfica
embocadura	distal (SDemb)	Zona estuarina completamente regularizada, de forma em leque e com uma secção transversal do tipo trapezoidal definida por uma largura média de 376m e uma profundidade média de 4.7m. Representa uma área de ≈0.31km^2 da qual 79.7% abrangeu os ambientes submareais e apenas 17.9% os ambientes intermareais e 2.4% os supramareais AS. Destes ambientes AI, 12.3% representaram as áreas influenciadas pelas marés mortas e os restantes 5.6% foram condicionadas apenas pelas marés vivas. Relativamente a todo o estuário, estes ambientes ASP representaram 2.09% e os AI e os AS, respectivamente 0.47% e 0.06% da área deste sistema. Representou um volume de ≈1.8x10^{6}m^3 que correspondeu a 4.5% de V_E. Daquele, os ambientes ASP representaram 51.%, os AI 36.8% e os AS 11.4%, em que %AI≈%AIF+%AIE=23.6%+13.3%. Relativamente a todo o estuário, os ambientes ASP representaram 2.35%, os AI 1.67% e os AS 0.52%. Correspondeu a um sector do estuário dominado por ambientes sempre imersos. Os ambientes intermareais restringiram-se às duas praias internas e às estreitas margens dos molhes exteriores.
	proximal (SPemb)	Correspondeu a um troço de canal com 560m de comprimento, completamente regularizado de secção trapezoidal, definida por uma largura média de 168m e uma profundidade média de 7.6m, muito regular longitudinalmente. Abrangeu uma área de ≈0.097km^2 da qual os ambientes sempre imersos representaram 94%, os intermareais apenas ≈5.3% e os AS 0.7%. Os AI foram repartidos em 3.6% para as marés mais frequentes (AIF) e em 1.8% para as marés vivas. A sua área representou apenas 0.82% de A_E, da qual ASP, AI e AS representaram apenas respectivamente 0.77%, 0.04% e 0.01%. O volume deste sector foi da ordem dos ≈0.91x10^{6}m^3 do qual 66.1% correspondeu a ASP, 26.3% a AI e 7.7% a AS, definindo desta forma um sector do estuário dominado pelos ambientes sempre imersos. O volume das áreas intermareais foi repartido maioritariamente pelas marés mortas, com 16.8% de AIF e 9.5% de AIE. Aquele volume representou 2.17% do volume V_E e os ambientes ASP, AI e AS simbolizaram 1.43%, 0.57% e 0.17%. Relativamente ao troço anterior representou um decréscimo da largura do canal e um aumento relativo da altura da coluna de água. A entrada da maré para este sector indicia um domínio dos fenómenos de convergência, pelo que terá tido um comportamento hipso-síncrono.
braço norte	distal (SDBN)	Canal regularizado definido por uma extensão longitudinal de 1.3km, com uma largura média de 292m e uma profundidade média de 5.4m, que tendeu a decrescer para montante. Estendeu-se por uma área de 0.41km^2 da qual os ambientes sempre imersos representaram 90.4%, os intermareais apenas 3.2% e os AS 6.4%. Estas áreas intermareais restringiram-se às margens do canal, pelo que %AI≈%AIF+%AIE≈1.6%+1.6%. A área deste segmento representou 3.5% da do estuário e os seus ambientes ASP, AI e AS respectivamente 3.16%, 0.11% e 0.22%. Este segmento abrangeu um volume de ≈2.8x10^{6}m^3 do qual 55.7% correspondeu aos ASP, 34% aos AI e 10.2% aos AS. Este sector representou 6.78% do estuário e os seus ambientes ASP definiram 3.78%, AI 2.3% e AS 0.69%. Representou um troço de canal mais amplo e menos profundo relativamente ao anterior, mas igualmente dominado pelos ambientes sempre imersos. Estes elementos fisiográficos indiciam uma prevalência do atrito de fundo nos processos distorcivos e um comportamento hipo-síncrono quanto à propagação da maré.
	médio (SMBN)	Canal pouco antropizado com 1.2km de comprimento, com uma largura média de 288m e uma profundidade média de 2.6m. Esta tendeu a decrescer para montante muito embora tenha tido uma distribuição espacial muito regular. Este canal representou uma área de ≈0.35km^2 a qual os ambientes sempre imersos simbolizaram 94.8%, os intermareais apenas 4.7% e os AS 0.5%. As áreas intermareais reflectiram %AI≈%AIF+%AIE≈3.0%+1.7%. Relativamente à área de todo o estuário estes ambientes simbolizaram respectivamente áreas parciais de 2.83%, de 0.14% e de 0.01%. Este canal representou um volume total de ≈1.6x10^{6}m^3, o qual 30.2% correspondeu aos ASP, 54.2% aos AI e 15.6% aos AS. Os volumes dos ambientes intermareais mais frequentes representaram 34.7% e os AIE 19.5%. Aquele volume representou 3.84 de V_E, e os respectivos ambientes, simbolizaram 1.16%, 2.08% e 0.60%. Comparativamente ao troço precedente, correspondeu a um canal de largura muito semelhante, mas muito menos profundo, mas também dominado pelos ambientes sempre imersos. O atrito de fundo terá dominado os processos distorcivos da maré, sugerindo um comportamento hipo-síncrono.
	proximal (SPBN)	Canal pouco antropizado com 3.7km de extensão longitudinal, definido por uma largura média de 451m, com uma profundidade média de 1.6m. A sua área de ≈1.97km^2 foi composta em cerca de 50.7% por ambientes submareais ASP e em 46.4% por ambientes intermareais, enquanto apenas 2.8% pelos ambientes AS. As áreas intermareais sujeitas às marés mais frequentes

braço norte (cont.)	proximal (SPBN)	representaram 25.5% enquanto as influências apenas pelas marés vivas descreveram 20.9%. Os ambientes intermareais foram fundamentalmente representados por extensas barras de canal, planícies intermareais e áreas de sapal. As áreas de alto e baixo sapal representaram respectivamente 6.1% e 5.1%, enquanto as áreas de *Zostera nolti* ≈0.9%. Nos ambientes AS, as zonas de pântanos estuarinos ocuparam 4.1% da área do estuário. Relativamente à área total do estuário, este segmento representou 16.69% e os seus ambientes 8.47% (para os ASP), 7,75% (para os AI) e 0.48% (para os AS). Este canal definiu um volume da ordem $6.45x10^6m^3$, que foi repartido em 15.8% pelos ambientes ASP, em 62.8% pelos AI e em 21.4% pelos AS. Os volumes intermareais foram segmentados em 40.8% para AIF e em 22.0% para AIE. Os ambientes ASP foram representados por estreitos canais, Relativamente ao troço anterior, passou a definir um canal muito mais amplo, mas menos profundo, dominado quer ambientes intermareais, quer por ambientes submareais mas muito pouco profundos. No contexto global do estuário este segmento de canal representou 15,44% e os seus ambientes simbolizaram 2,43%, 9,70% e 3,31 respectivamente para ASP, AI e AS. Estes elementos fisiográficos apontam para que o atrito de fundo tenha tido um papel primordial na distorção dos escoamentos e para que a maré tenha tido um comportamento hipo-síncrono.
Leito Regularizado do Baixo Mondego	distal e Proximal (CRBM)	Correspondeu a um canal completamente regularizado, muito rectilíneo, de secção trapezoidal composta, definida por dois leitos (o leito menor e o maior). Este canal apresentou um desenvolvimento longitudinal de ≈18.4km e definiu um troço estuarino de largura média de 234m e uma profundidade média de ≈2.4m, que ocupou uma área total de $\approx 6.0km^2$ e representou um volume da ordem dos $\approx 20.7x10^6m^3$. Cerca de 49% da área e do volume deste canal foram representados pelos ambientes intermareais que se limitaram praticamente aos fundos do leito maior, enquanto os ambientes submareais restringiram-se aos fundos do leito menor (com ASP≈42.5% da área e ≈30.8% do Volume). Os ambientes supramareais AS representaram cerca de 19.6% do volume deste canal e ocuparam uma área de apenas 8.5%, mas restringiram-se ao leito maior deste canal. O leito menor ocupou uma área aproximada de $\approx 2.86km^2$ que representou cerca de 47.6% da área total deste canal, que foi representada pelo leito de maior. Aquele também definiu um volume da ordem dos $8.2x10^6m^3$ que perfez 40% do volume estuarino do Leito Regularizado do Baixo Mondego. O leito menor foi definido por uma profundidade média de ≈2.9m e por uma largura média de ≈150m, muito embora ambas tenham decrescido gradualmente para montante. O seu leito maior representou uma área de $\approx 3.15km^2$ e determinou um volume da ordem dos $12.4x10^6m^3$. Apresentou uma largura média de ≈315m, que também decresceu para montante. Comparativamente com o troço anterior este canal foi menos largo, mais profundo e exibiu uma tendência para ser mais estreito para montante. Tendo sido fundamentalmente representado pelo leito menor, a sua fisiografia terá proporcionado um domínio dos processos de convergência na distorção da onda de maré, indiciando um comportamento hipso-síncrono.
braço sul	distal (SDBS)	Canal regularizado definido por uma extensão longitudinal de 1.3km, por uma largura média de 189m e por uma profundidade média de 3.1m. A batimetria decresceu suavemente para montante. Abrangeu uma área de $0.25km^2$ representada fundamentalmente por ambientes sempre imersos (com ASP≈93.5%), tendo os ambientes inter e supramareais definido uma porção da área de apenas 5.9% e 0.6%, respectivamente. As áreas intermareais restringiram-se às margens deste canal com 3.4% de AIF e com 2.4% de AIE. Este canal representou um volume de $\approx 1.3x10^6m^3$ do qual 35.5% correspondeu aos ambientes ASP, 49.3% aos AI e 14.3% aos ambientes AS. Os volumes intermareais apresentaram um relação de 31.5% para AIF e de 17.7% para AIE. Definiu um sector do estuário muito pouco profundo mas dominado por ambientes sempre imersos. Relativamente ao troço precedente descreveu um troço de canal periférico, muito mais estreito e com menor altura da coluna de água que decresceu para montante, indiciando estas características fisiográficas um predomínio nos fenómenos de convergência em detrimento do atrito de fundo, pronunciando um comportamento hipso-síncrono na maré.
	Médio (SMBS)	Descreveu um segmento do braço sul pouco antropizado, caracterizado por uma extensão longitudinal de ≈2km, por uma largura média de 345m e por uma profundidade média de apenas 1.0m. A sua largura e batimetria decresceram para montante. Definiu uma área de $\approx 1.0km^2$ da qual apenas 21.2% correspondeu a ambientes submareais permanentes, e 1.6 a supramareais AS, enquanto 77.2% a ambientes intermareais. As áreas intermareais mais frequente representaram cerca de 60.3%, enquanto as sujeitas apenas às marés vivas 16.9%. Este canal também definiu um volume de $2.6x10^6m^3$, representativo de um domínio do ambientes intermareais, com 65.7%, restando 28.2% para os ambientes supramareais AS e apenas 6.1% para os submareais ASP. A relação ocorrida entre os volumes dos ambientes intermareais traduziu-se em %AI≈%AIF+%AIE=42%+23.7%. O domínio dos ambientes intermareais traduziu-se por amplas barras, planícies mareais, diversos canais de drenagem e zonas de sapal (baixo sapal) representadas por *Spartina marítima* e *Zostera nolti*. As áreas de alto sapal representaram cerca de 8.8%, as de baixo sapal 22.9% enquanto as áreas de *Zostera nolti* ≈4%. Os ambientes sempre imersos restringiram-se a um estreito canal localizado junto à margem sul deste sector. Relativamente ao sector anterior, descreveu um troço de canal muito mais amplo e menos profundo, consentâneo com o domínio do atrito de fundo nos processos distorcivos na propagação da maré, indiciando um comportamento hipo-síncrono.
	proximal (SPBS)	Representou um segmento do braço sul muito pouco antropizado, definido por um comprimento de ≈3.5km, por uma largura média de 141m e por uma profundidade média de apenas 0.6m. Quer a sua largura, quer a batimetria decresceram para montante. Ostentou uma área de $\approx 1.15km^2$ representada fundamentalmente pelos ambientes intermareais com 86.1%, encontrando-se os restantes 3.4% e 10.6% para os ambientes submareais e supramareais, respectivamente. As áreas influenciadas pelas marés mais frequentes abrangeram 53.9% e as apenas sujeitas às marés vivas 32.1% (AIE). As áreas de alto e baixo sapal representaram 21.1% e 20.3% deste sector, enquanto as de *Zostera nolti* ≈3.7%. Este canal definiu um volume de $\approx 2.0x10^6m^3$, repartido em 61.1% pelos ambientes intermareais, em 38.4% pelos ambientes supramareais e em apenas 0.6% pelos ambientes submareais ASP. OS volumes intermareais foram caracterizados em 37.7% para AIF e em 23.3% para AIE. Correspondeu a um sector do estuário dominado pelos ambiente intermareais, em que as planícies, os canais de maré e as zonas de baixo (com *Spartina marítima*, *Scirpus maritimus* e *Zostera Nolti*) e alto sapal predominaram. Relativamente ao segmento anterior, representou um troço de canal mais estreito, mas muito menos profundo, dominado pelos ambientes intermareais, pelo que o atrito de fundo terá tido um papel relevante na distorção da maré, indiciando um comportamento hipo-síncrono.
Porto de Pesca, Docas dos Bacalhoeiros, e de Recreio e Serviços	ambientes antrópicos protegidos	Corresponderam a estruturas artificiais, periféricas aos canais principais na zona portuária do estuário. Definiram ambientes protegidos (representando zonas de sombra hidrodinâmica.). Apresentam um fundo plano e composto por sedimentos lodosos.

Quando analisadas separadamente as dimensões dos dois canais mais importantes do estuário, concluiu-se que também apresentaram diferenças significativas. O canal principal abrangeu a embocadura, o braço norte e o troço estuarino do CRBM, como se pode verificar nas figuras 2.1 e 2.2, tendo sido descrito por uma profundidade e uma largura médias de $\overline{h}_{CP,O} \approx 2.7m$ e de $\overline{b}_{CP,O} \approx 265m$, respectivamente, enquanto que antes dos trabalhos de regularização

apresentava-se menos profundo com $\bar{h}_{CP} \approx 2.5$m. O comprimento deste canal correspondeu ao comprimento longitudinal máximo descrito anteriormente para o estuário. Tomando o sector proximal do braço norte como referência afim de melhor compreender as alterações morfológicas introduzidas no estuário[7] com o novo traçado do braço norte, verificou-se que quando apresentava as barras intermareais e as áreas de sapal, este troço de canal era representado para os 3 patamares médios da superfície livre em análise, por $\bar{h}_{SPBN,BMM} \approx 1.1$m, $\bar{h}_{SPBN,NMM} \approx 1.6$m, $\bar{h}_{SPBN,PMM} \approx 2.3$m definindo uma amplitude de variação da profundidade média de $\Delta\bar{h}_{SPBN} = [\bar{h}_{SPBN,PMM} - \bar{h}_{SPBN,BMM}] \approx 1.2$m para uma variação da superfície livre de $A_w \approx 1.6$m e uma variação da largura do canal de $\Delta\bar{b}_{SPBN} \approx 136$m, por ter ostentado $\bar{b}_{SPBN,BMM} \approx 359$m, $\bar{b}_{SPBN,NMM} \approx 451$m e $\bar{b}_{SPBN,PMM} \approx 495$m. Com a regularização deste sector estuarino a amplitude de variação da profundidade média foi de apenas $\Delta\bar{h} \approx 0.1$m para a oscilação da superfície livre para as marés mais frequentes, bem como, uma variação da largura do canal muito superior, na ordem dos $\Delta\bar{b}_{SPBN,O} \approx 232$m (com base nos resultados obtidos de $\bar{h}_{SPBN,BMM,O} \approx 2.5$m, $\bar{h}_{SPBN,NMM,O} \approx 2.1$m, $\bar{h}_{SPBN,PMM,O} \approx 2.6$m e de $\bar{b}_{SPBN,BMM,O} \approx 234$m, $\bar{b}_{SPBN,NMM,O}$ 399m e $\bar{b}_{SPBN,PMM,O} \approx 466$m). O braço sul ocupou uma posição marginal relativamente ao canal anterior, delimitando estes a sul e a norte a ilha da Murraceira, de acordo com a figura 5.2. 1. Foi definido por um comprimento de $L_{BS} \approx 6.8$km e descreveu um canal muito pouco profundo com $\bar{h}_{BS,NMM} \approx 1.7$m, embora com uma forma muito irregular pode ser definida por uma largura média que rondou os $\bar{L}_{BS,NMM} \approx 241$m. Nas marés mais frequentes ($A_w \approx 1.6$m), evidenciou uma amplitude de variação da profundidade média de apenas $\Delta\bar{h}_{BS} \approx 0.1$m e uma $\Delta\bar{b}_{BS} \approx 186$m, tendo constituído um resultado algo semelhante ao registado com o obtido com a regularização do sector proximal do braço norte, mas neste caso esteve relacionado com o facto de o troço distal do braço sul ter sido dominado

[7]. Por já apresentar a morfologia do tipo trapezoidal composta definitiva no levantamento de 1995.

pelos ambientes submareais, enquanto os restantes troços praticamente constituídos por ambientes intermareais.

Quadro 5.2. 4. Características morfológicas, batimétricas e estruturais apresentadas pelos diferentes sectores do estuário, durante as obras de regularização do braço norte. Definição das importâncias relativas dos diferentes ambientes em estudo em cada sector fisiográfico. A profundidade média e a largura dos canais foram determinados para o nível médio das águas do mar, para +2mZH. ASP representou os ambientes submareais permanentes, AI, os ambientes intermareais, AIF os ambientes intermareais mais frequentes, AIEF os ambientes esporadicamente expostos ao ar pela maré e AS os ambientes apenas inundados aquando de níveis de cheia ou sob temporais.

Troços de canal	Sectores	Descrição fisiográfica dos sectores condicionados pelos trabalhos de regularização do braço norte
embocadura	Distal (SDemb)	Este sector do estuário foi sujeito a trabalhos de dragagem entre 1991 e 1995 no âmbito da regularização do braço norte e afim de permitir o movimento portuário de navios. Teve como principal alteração um aumento da profundidade média deste sector em apenas 0.2m, passando este sector a apresentar $\bar{h}_{SPeb} \approx 4.9$m. A área e o volume deste sector passaram a representar 2.48% e 4.38% do estuário. Os volumes referentes aos ambientes submareais ASP sofreram um ligeiro aumento relativo passando a representar 2.34% de V_E continuando a dominar este sector estuarino.
	Proximal (SPemb)	Mesmo tendo sofrido trabalhos de dragagem a profundidade média deste troço de canal permaneceu igual ao levantamento anterior, com $\bar{h}_{SDeb} \approx 7.6$m. Com as obras no braço norte, a área e o volume deste sector passaram a representar 0.8% e 2.10% da área e do volume de todo o estuário. Este sector do estuário dominado pelos ambientes sempre imersos, relativamente ao sector anterior, continuou a definir um decréscimo considerável da largura do canal e um aumento relativo da altura da coluna de água e a sugerir um domínio dos fenómenos de convergência e um comportamento hipso-síncrono da maré.
braço norte	Distal (SDBN)	Aquando deste levantamento batimétrico a draga encontrava-se localizada frente ao cais comercial. Relativamente ao levantamento batimétrico precedente, evidenciou um ligeiro aumento (de 0.1m) na batimetria média, passado para 5.5m, traduzido num ligeiro aumento relativo dos ambientes submareais ASP que passaram a representar 3.86% de V_E, muito embora a fisiografia deste torço de canal ainda não se encontrasse regularizada. Nesta fase das obras representou um troço de canal mais amplo e menos profundo relativamente ao troço anterior, mas igualmente dominado pelos ambientes sempre imersos. Estes elementos fisiográficos indiciam uma prevalência do atrito de fundo nos processos distorcivos e um comportamento hipo-síncrono na propagação da maré.
	Médio (SMBN)	Com o novo traçado, este canal passou a ser definido por uma profundidade média um pouco superior (+0.5m), da ordem dos 3.1m e a ser definido por uma variação espacial da batimetria muito regular. Neste sector registou-se um decréscimo da área ocupada pelos ambientes submareais ASP para os 87.9% e um aumento relativo da área dos ambientes intermareais AI para os 11.4%. Estes passaram a representar percentagens de 2.63% e de 0.34% relativamente a todo o estuário. Contudo, a área total ocupada por este troço de canal permaneceu praticamente igual. Quanto à análise volumétrica, registou-se um aumento relativo dos volumes dos ambientes ASP para 37.4% em resultado do aprofundamento do canal e um decréscimo relativo dos ambientes intermareais AI para os 48.4%. Os ambientes submareais ASP passaram a estar localizados no leito menor e a definir 1.56% de V_E, enquanto os ambientes intermareais AI passaram a estar praticamente confinados ao fundo do leito maior e a representar 2.03% de V_E. O volume imerso deste troço de canal passou a ser da ordem dos $1.76 \times 10^6 m^3$. Correspondeu a um troço de canal de largura muito semelhante ao anterior, mas menos profundo (≈-2.4m), pelo que terá conferido um comportamento hipo-síncrono à propagação da maré.
	Proximal (SPBN)	O novo traçado deste segmento do estuário conferiu um aumento relativo da profundidade média dos 1.6m para os 2.1m. Reflectiu-se num aumento relativo do volume imerso, sem que tivesse havido uma alteração da área plana total abrangida por ele. Porém, o peso relativo dos vários ambientes foi por completo alterada. Neste segmento do braço norte a área dos ambientes ASP sofreram um decréscimo relativo passando a representar 35.8%, enquanto os AI aumentaram passando a abranger 60.1%. Relativamente a toda a área do estuário, passaram a reflectir percentagens de 6.01% e de 10.8% e os ambientes AS 0,68%. O volume imerso abrangente por este troço de canal passou a ser da ordem dos $\approx 6.7 \times 10^6 m^3$, reflectindo um aumento relativo dos ambientes ASP para os 27.1% e um decréscimo relativo dos ambientes AI para os 52.3%. Aquele volume passou a representar 15.88% do volume imerso de todo o estuário e os ambientes ASP 4.31% e os AI 8.30%. Os ambientes ASP passaram a estar confinados ao leito menor (canal mais estreito e mais profundo), enquanto os intermareais confinados aos fundos do leito maior, que se desenvolveram lateralmente ao canal anterior, e definiram vastas planícies que definiram um ligeiro decréscimo da batimetria para montante. Estes elementos fisiográficos apontam para que o atrito de fundo tenha tido um papel dominante na distorção dos escoamentos e que a maré tenha tido um comportamento hipo-síncrono.

5.2.2.2 Razão Largura/Profundidade

A maré ao propagar-se no interior de um estuário vai sofrer distorção fundamentalmente relacionada com as variações das características físicas e fisiográficas dos canais principais. De acordo com Le Floch, 1961 *in* Borrego *el al* (1995) aquela pode ser representada pela resposta da onda à competição ocorrida entre o atrito de fundo e o fenómeno de convergência que controla a evolução da amplitude da onda ao longo de um estuário pouco profundo, não estratificado (Tonda, 1999). Aubrey (1986), Speer & Aubrey (1985) e Speer *el al* (1991) relacionaram o atrito

de fundo e a presença das áreas intermareais como principais condicionantes desta distorção. De acordo com Borrego *el al* (1995) o fenómeno de convergência pode ser explicado com base na variação longitudinal da razão largura/profundidade, ou na relação entre área e perímetro molhado das diferentes secções transversais no estuário (Tonda, 1999). Os referidos autores definiram para estuários pouco profundos não estratificados, de que é exemplo o Mondego sob baixos a moderados regimes fluviais, que a diminuição do perímetro molhado ou da largura dos canais para montante tende a gerar vazantes mais curtas com velocidades de maior magnitude, definindo um domínio da vazante. Esta assimetria da maré também se relaciona com uma maior capacidade de armazenamento de água nos ambientes intermareais, bem como, os sectores do estuário com esta tendência evolutiva tendem apresentar uma grande capacidade em erodir os canais, aumentando a sua profundidade, razão pela qual esta tendência evolutiva também ser associada a canais mais fundos. Contudo, um decréscimo da área das secções transversais ou da profundidade média mais significativo, para montante, tende a produzir enchentes mais curtas e a apresentar velocidades mais fortes, definindo uma tendência evolutiva de domínio da enchente, sendo o atrito, neste exemplo o principal processo interveniente na distorção da maré (Dyer, 1986; Speer *el al* (1991); Dyer, 1997). Uma vez que as variações quer da profundidade média, quer da largura dos canais estuarinos dependem das oscilações da superfície livre (Tonda, 1999), a propagação da maré no interior do estuário do Mondego pode ser analisada do ponto de vista fisiográfico recorrendo à análise da variação da relação largura/profundidade no sistema, quer segundo uma perspectiva longitudinal aos seus canais principais, quer estudando a sua variabilidade para os diferentes patamares médios da superfície livre.

Variação Vertical da Relação Largura/Profundidade

Quando relacionadas as profundidades médias determinadas para os diferentes patamares médios da oscilação da superfície livre no estuário com as correspondentes variações da largura média, foi possível identificar várias regressões que se encontram representadas no gráfico da figura 5.2. 6. Neste, encontram-se expressos em ordenadas os incrementos acumulados da profundidade média no estuário ($\sum \overline{h}_E$), no canal principal ($\sum \overline{h}_{CP}$) e no braço sul ($\sum \overline{h}_{BS}$) e em abcissas os correspondentes aumentos acumulados da largura média (de $\sum \overline{b}_E$, $\sum \overline{b}_{CP}$ e de $\sum \overline{b}_{BS}$). A sua análise permitiu apurar as diversas tendências de variação definidas para o estuário e para o canal principal apresentaram uma grande semelhança morfológica entre si, com distribuições matemáticas muito próximas. Com as obras de regularização passou-se a registar um maior afastamento na variação deste parâmetro geométrico entre $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{CP}$ e $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_E$, acima da cota dos +1.5mZH. As variações deste parâmetro no braço sul reflectiram uma fisiografia diferente, traduzidas por um maior e crescente afastamento relativamente à regressões lineares definidas para E e CP, praticamente acima da cota dos ≈+1.5mZH. A análise deste gráfico também permitiu definir para cada um dos três sectores em estudo (E, CP e BS) dois tipos de regressões distintos do parâmetro $\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b}$, que foram lineares, significativas e correspondentes aos intervalos de variação da superfície livre compreendidos entre os [+0.8; +1.5mZH] e os [+1.5; +4mZH], com funções expressas na legenda da figura 5.2. 6. Estes dois tipos de regressões identificados na variação deste parâmetro geométrico quer para o braço sul, quer para o canal principal, quer para o estuário, ter-se-ão reflectido na hidrodinâmica estuarina em efeitos distorcivos desiguais aquando da variação da superfície livre e consequentemente em comportamentos distintos na propagação da maré, que terão sido consentâneos com as principais diferenças morfológicas e batimétricas que caracterizam verticalmente o estuário.

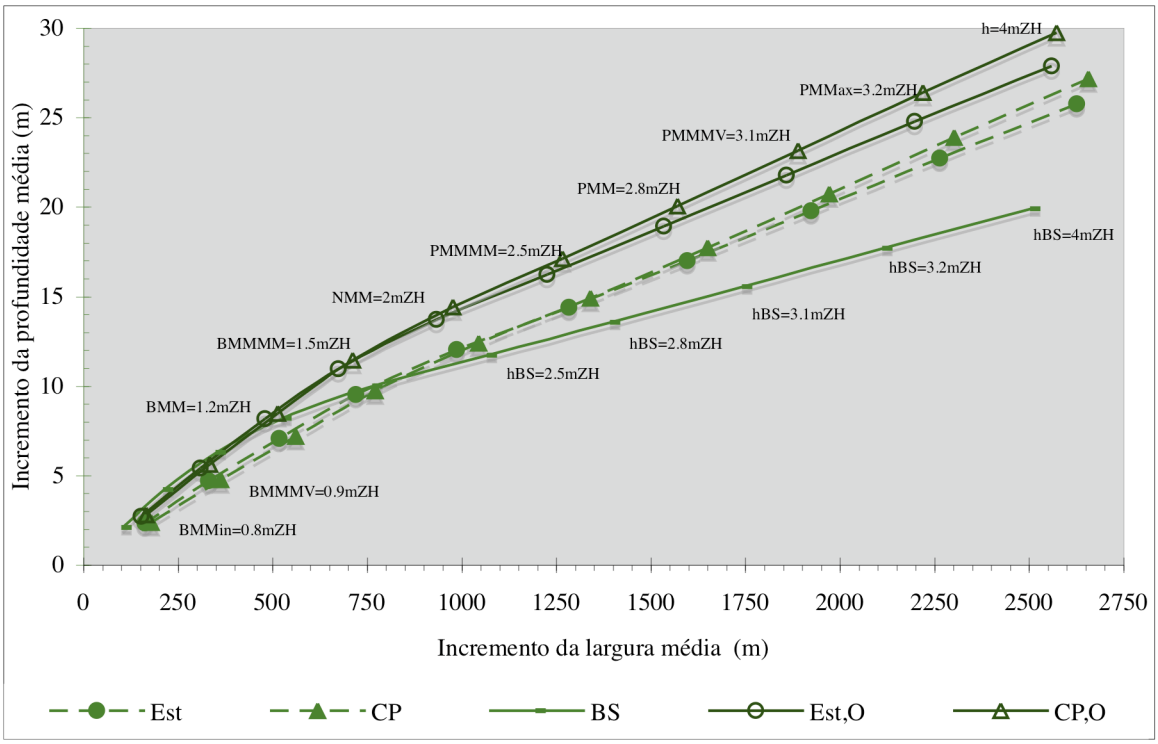


Figura 5.2. 6. Diagrama representativo das variações da largura/profundidade dos dois principais braços do estuário do Mondego referentes aos patamares médios da superfície livre. Para o intervalo $0.8<\eta_{x,y,E}<1.5$mZH as regressões obtidas apartir do levantamento batimétrico de 1995 foram para o estuário $\Sigma \overline{h}_{E,O} \approx 0.016(\Sigma b_{E,O}) + 0.428$ com $r^2_{E,O}=0.998$, $r_{E,O}=0.999$, $p<0.01$, $N_{E,O}=4$ e para o canal principal $\Sigma \overline{h}_{CP,O} \approx 0.016(\Sigma b_{CP,O}) + 0.272$ com $r^2_{CP,O}=0.999$, $r_{CP,O}=0.999$, $p<0.01$, $N_{CP,O}=4$. Antes das obras de regularização foram $\Sigma \overline{h}_{E} = 0.013(\Sigma b_{E}) + 0.368$ com $r^2_{E}=0.998$, $r_{E}=0.999$, $p<0.01$, $N_{E}=4$; $\Sigma \overline{h}_{CP} \approx 0.012(\Sigma b_{CP}) + 0.243$ com $r^2_{CP}=0.999$, $r_{CP}=0.999$, $p<0.01$, $N_{CP}=4$; para o braço sul $\Sigma \overline{h}_{BS} \approx 0.014(\Sigma b_{BS}) + 0.949$ com $r^2_{BS}=0.949$, $r_{BS}=0.992$, $p<0.01$, $N_{BS}=4$. Para o $[+1.5<\eta_{x,y,E}<4$mZH$]$ obtiveram-se as regressões: $\Sigma \overline{h}_{E,O} \approx 0.0089(\Sigma b_{E,O}) + 5.265$ com $r^2_{E,O}=0.999$, $r_{E,O}=0.999$, $p<0.01$, $N_{E,O}=7$ e $\Sigma \overline{h}_{CP,O} \approx 0.0098(\Sigma b_{CP,O}) + 4.732$ com $r^2_{CP,O}=0.999$, $r_{CP,O}=0.999$, $p<0.01$, $N_{CP,O}=7$. Antes da regularização $\Sigma \overline{h}_{E} = 0.0085(\Sigma b_{E}) + 3.525$ com $r^2_{E}=0.999$, $r_{E}=0.999$, $p<0.01$, $N_{E}=7$; $\Sigma \overline{h}_{CP} \approx 0.009(\Sigma b_{CP}) + 2.643$ com $r^2_{CP}=0.999$, $r_{CP}=0.999$, $p<0.01$, $N_{CP}=7$; para o braço sul $\Sigma \overline{h}_{BS} \approx 0.006(\Sigma b_{BS}) + 5.389$ com $r^2_{BS,O}=0.999$, $r_{BS,O}=0.999$, $p<0.01$, $N_{BS}=7$.

Para variações da superfície livre compreendidas entre as cotas +0.8mZH e os +1.5mZH, identificaram-se para o BS, para o CP e para o estuário, regressões que traduziram variações da profundidade média muito superiores às acontecidas com a largura média (figura 5.2. 6). As variações da superfície livre registadas para o canal principal e para todo o estuário foram representativas de um aumento relativo de $\overline{h}_{x,y}$ superior ao verificado com a largura, traduzindo um aumento relativo da altura da coluna de água nos canais. Este comportamento de $\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b}$ reflectiu a inundação da parte inferior da secção trapezoidal dos canais da zona portuária do

estuário[8], e a inundação do leito menor que se estendeu pelos sectores CRBM e médio-proximal do braço norte (neste último exemplo após a regularização deste braço). Muito embora a variação de $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{0.8\leq\eta<1.5mZH}$ registada no braço sul tenha sido um pouco mais elevada, reflectiu um comportamento diferente do descrito anteriormente, uma vez ter definido um decréscimo relativo de $\overline{h}_{x,y}$ mais pronunciado ao acontecido com o aumento da largura deste braço. Este decréscimo relativo da profundidade média deste canal, fundamentou-se em magnitudes de $\overline{h}_{BS,z=0.8mZH}\approx2.1m$ e $\overline{b}_{BS,z=0.8mZH}\approx103m$ quando apenas se encontrava submerso o sector distal, para passar a ostentar $\overline{h}_{BS,z=1.5mZH}\approx1.8m$ e $\overline{b}_{BS,z=1.5mZH}\approx174m$ quando inundadas as margens dos canais intermareais que flanqueiam as grandes barras, localizadas no sector médio do braço sul. Esta variação da superfície livre ($0.8\leq\eta_{x,y,E}<1.5mZH$) abrangeu as BMMin, as BMMMV, as BMM e as BMMMM, representando as fases de menor altura da coluna de água dos diferentes ciclos de maré, regulando as fases iniciais da enchente e as finais da vazante. As regressões de $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{0.8\leq\eta<1.5mZH}$ definidas para o canal principal e para o estuário, antes e durante os trabalhos de regularização do braço norte apresentam-se praticamente coincidentes nesta fase de variação do nível da água, em resultado da reduzida contribuição relativa por parte deste parâmetro geométrico do braço sul, por apenas descrever a imersão do sector distal e parte do sector médio, como se ilustra nos mapas a), b), c), d) e e) das figuras 5.2. 3 e 5.2. 4. Aquelas regressões também permitiram verificar que a regularização do braço norte conferiu ao canal principal um incremento relativo deste parâmetro, traduzido numa maior variação da profundidade média deste canal para a oscilação da componente vertical da maré em análise.

Quando analisadas as regressões lineares de $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{BS}$, $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{CP}$ e $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{E}$ definidas para o intervalo de variação da superfície livre compreendido entre as cotas +1.5mZH e os +4mZH, verificou-se que estas passaram a descrever uma maior variação da largura média

[8]. O sector portuário do estuário encontra-se representado pelos sectores distal e proximal da embocadura e sectores distais dos braço norte e sul.

dos canais em detrimento da profundidade média. Esta variação foi mais elevada no braço sul e comparativamente mais pequena no canal principal. Abrangeu as BBMM, o NMM, as PMMMM, as PMM, as PMMMV e as PMMax, ou seja, a maior parte da altura da maré. Representaram fundamentalmente a inundação das secções trapezoidais simples dos canais da zona portuária e a inundação do leito maior (de secção trapezoidal composta) do restante traçado do canal principal. A esta variação vertical na fisiografia do estuário, terá estado associado um abrandamento dos escoamentos nas fases de enchente consequência do alagamento de uma área maior. Nas fases de vazante esta fisiografia terá favorecido a circulação dos escoamentos para fora do sistema e consequentemente promovido o aumento da celeridade destes, bem como, a saída dos caudais do Mondego. No braço sul, o aumento da largura do canal muito superior ao verificado com a profundidade média reflectiu a inundação dos ambientes intermareais que dominaram os sectores médio-proximal, representados por grandes barras, extensas planícies intermareais e áreas de sapal como se ilustra nos mapas e), f), g), h), i) e j) das figuras 5.2. 3 e 5.2. 4. Este tipo de fisiografia favoreceu uma maior distorção dos escoamentos resultantes da interacção das correntes da maré com o fundo deste braço. As regressões $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{CP,O}$ e $(\Delta\overline{h}/\Delta\overline{b})_{E,O}$ referentes à regularização do braço norte, reflectiram fundamentalmente um aprofundamento do canal principal e um rebaixamento da cota apartir da qual se iniciou a inundação do canal sem qualquer tipo de obstrução, que neste caso coincidiu praticamente com a inundação das planícies intermareais representadas pelo leito maior.

Sector Proximal do Braço Norte

Com a finalidade de melhor avaliar os impactes hidrodinâmicos introduzidos com a alteração morfológica do braço norte, procedeu-se a um estudo comparativo das variações registadas deste parâmetro geométrico referentes apenas ao seu sector proximal, antes e depois da fisiografia definitiva (figura 5.2. 7). Da análise desta figura foi possível determinar que para o

levantamento batimétrico de 1991 ocorreram duas tendências de variação distintas de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{SPBN}$. Uma traduziu uma variação da superfície livre compreendida entre as cotas +0.8 e os ≈+2.5mZH, que foi representativa da inundação das barras e das extensas planícies intermareais e áreas de sapal localizadas neste sector estuarino. Esta, descreveu um aumento relativo da largura do canal mais pronunciado ao acontecido com a profundidade média, que também foi muito semelhante ao registado nos sectores médio-proximal do braço sul. De acordo com Dyer (1989), Tonda (1999) as forças de atrito geradas entre as macroformas de fundo deste canal e os escoamentos, terão tido uma magnitude proporcional ao aumento da largura média (ou do perímetro molhado) e terão sido inversamente proporcionais ao aumento da área (representada pela profundidade média). O *terminus* desta fase culminou com a submersão completa destas estruturas intermareais. Para variações da componente vertical da maré acima da cota $\eta_{x,y,E}$>2.5mZH, o sector proximal do braço norte passou a descrever uma variação praticamente linear do parâmetro $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{SPBN,2.5\leq\eta<3.2mZH}$, que foi representativa de um ligeiro aumento relativo da variação da profundidade média em detrimento da largura. Este comportamento relacionou-se com a inundação da parte superior do canal, com o espelho de água completamente desprovido de qualquer obstrução directa por parte das estruturas sedimentares de fundo intermareais.

Após a regularização deste troço de canal, o parâmetro $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{SPBN,O}$ passou a descrever também duas regressões lineares simples, mas completamente distintas, enquadradas na variação da superfície livre definidas pelos intervalos [+0.8; +1.2mZH] e]+1.2; 3.2mZH], como se ilustra na figura 5.2. 7. O primeiro representou a inundação do leito menor e o segundo a inundação do leito maior (figura 5.2. 4). Ambas regressões descreveram relativamente à fisiografia anterior um aumento considerável da variação da profundidade média, bem como, definiram um decréscimo relativo da cota de inflexão destes comportamentos de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{SPBN,O}$ que passou situar-se por volta dos +1.2mZH e que correspondeu à cota batimétrica mais baixa dos fundos do leito maior

(figura 2.2). A primeira definiu uma variação da profundidade média deste troço de canal muito superior à ocorrida com a da variação da largura média.

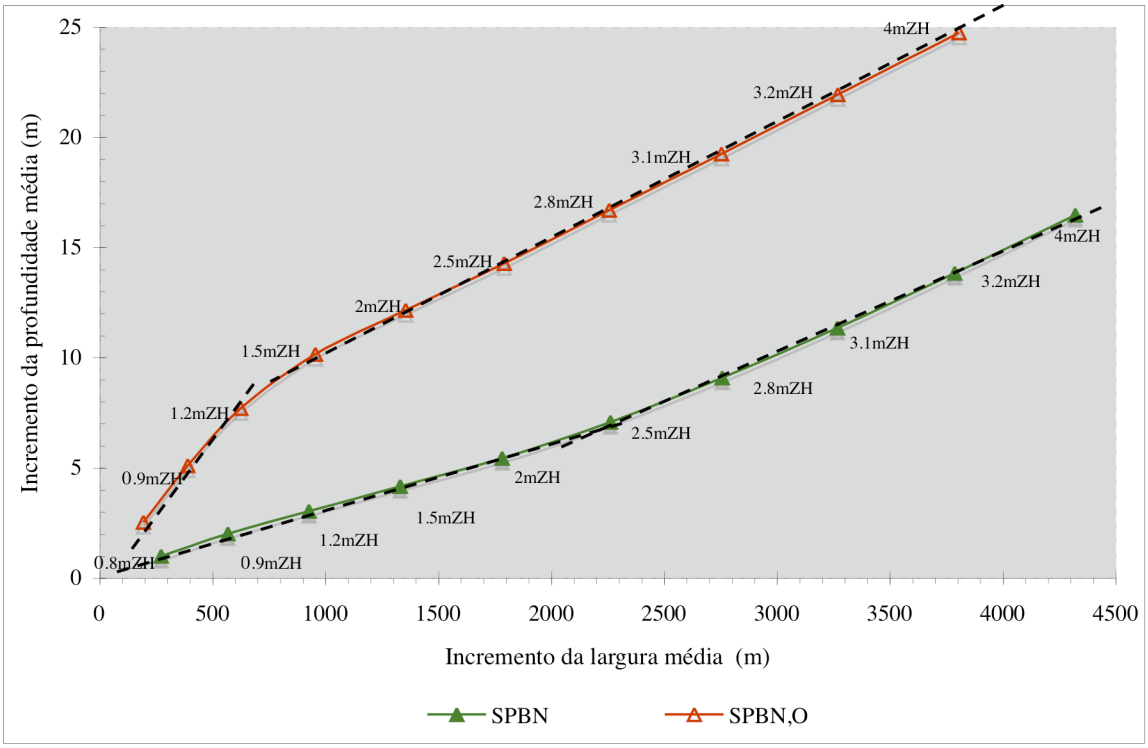


Figura 5.2. 7. Variação do parâmetro geométrico $(\Delta\overline{h} / \Delta\overline{b})_{SPBN}$ para os diferentes patamares médios da superfície livre, no sector proximal do braço norte, antes (SPBN) e depois da regularização deste troço de canal (SPBN,O).

Ao longo de cada ciclo de maré a profundidade e a largura do estuário vão-se modificando, condicionando directamente as forças de atrito geradas no fundo e nas margens dos canais, sendo a sua magnitude proporcional ao perímetro molhado e inversamente proporcional à área de cada secção (Dyer, 1989; Tonda, 1999). Desta forma, conhecendo a geometria das diferentes secções do estuário, torna-se também possível relacionar na figura 5.2. 6 as fases de menor altura da coluna de água e as definidas por maiores variações da largura dos canais com uma maior importância relativa por parte do atrito de fundo, que neste caso terá sido mais elevada no braço sul, e permitiu também constatar que a regularização do braço norte foi responsável por um decréscimo da importância relativa do atrito de fundo na hidrodinâmica deste canal.

Encontrando-se a velocidade de propagação da onda de maré nos diversos sectores do estuário relacionada com as variações da altura da coluna de água, sob a forma $c_w \approx (h)^{1/2}$, esta permitiu para as diferentes variações da profundidade média reproduzidas na figura 5.2. 6, associar as maiores celeridades com as maiores variações de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_\eta$ e as celeridades de menor magnitude com as menores variações deste parâmetro geométrico. Desta forma, as menores celeridades localizaram-se no braço sul e as maiores celeridades situaram-se no canal principal, que passaram a apresentar magnitudes ainda superiores com a nova fisiografia do braço norte (figura 5.2. 7).

A deformação da onda de maré também se encontra muito associada às diferenças na celeridade, ocorridas ao longo de cada ciclo de maré, dado sofrer um adiantamento na PM e um atraso na BM, reduzindo desta forma o intervalo de tempo compreendido entre a preia-mar e a baixa-mar (Tonda, 1999). A análise da figura 5.2. 6 também permitiu deduzir que no braço sul tiveram lugar as menores variações de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_\eta$ acontecidas entre as diferentes BM e PM, reflectindo quer menores magnitudes das celeridades da maré, quer menores diferenças de celeridades entre as enchentes e vazantes, indiciando também uma menor distorção da maré. A fisiografia adoptada para o braço norte também sugere ter sido favorável a um aumento relativo das diferenças da celeridade acontecidas entre as PM e as BM no CP, como se ilustra na figuras 5.2. 6 e 5.2. 7.

Variação Longitudinal da Relação Largura/Profundidade

Foram determinadas para os diferentes sectores fisiográficos do estuário as respectivas larguras e profundidades médias referentes aos três patamares médios mais frequentes da variação da superfície livre. Deu-se preferência à análise destes parâmetros médios para cada sector fisiográfico constituído por características morfológicas e batimétricas semelhantes, em detrimento de uma análise dimensional de eventuais secções transversais dispostas

longitudinalmente aos canais deste sistema, por apenas estas reflectirem condições locais. Na figura 5.2. 8 encontram-se projectadas as diferentes variações longitudinais de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_x$ determinadas quer para o canal principal, quer para o braço sul, durante as BMM, para o NMM e para as PMM. Quando relacionadas as variações acumuladas das profundidades médias destes sectores dispostos longitudinalmente aos canais mais importantes no estuário, com as respectivas variações longitudinais acumuladas das larguras médias, identificaram-se diferentes tendências de variação deste parâmetro, longitudinalmente aos canais mais importantes do estuário, bem como, comportamentos distintos de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_x$ entre o braço sul e o canal principal.

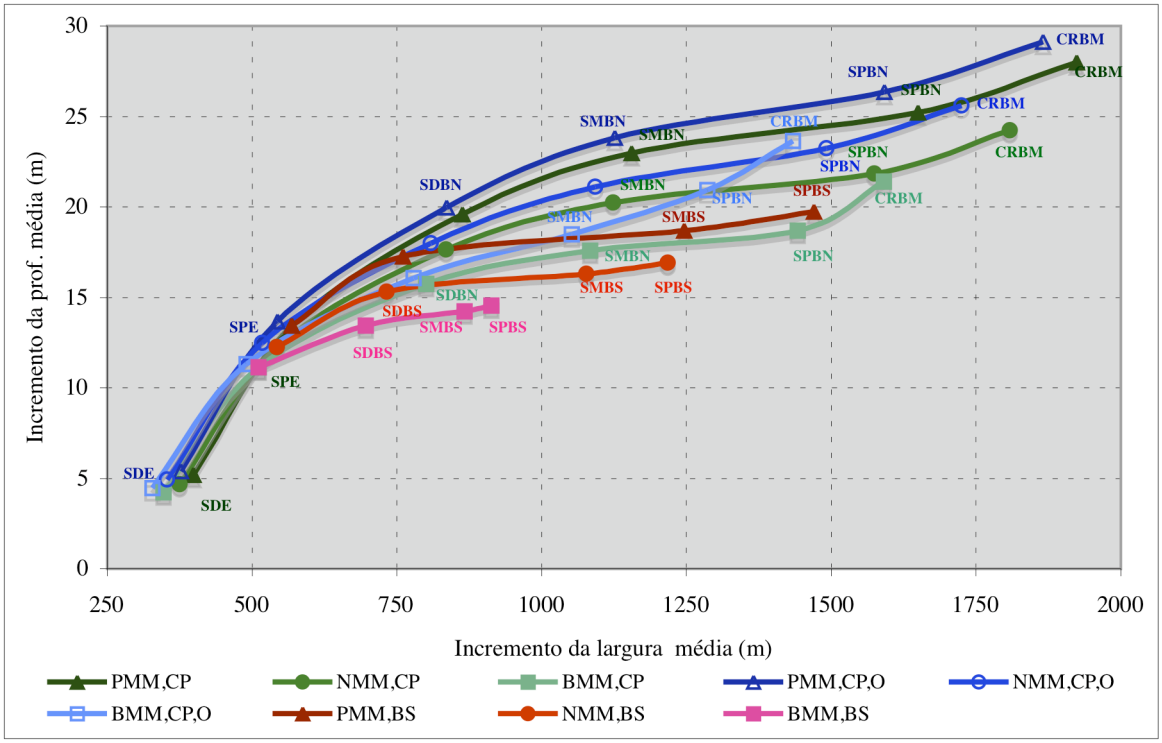


Figura 5.2. 8. Diagrama representativo das variações da razão largura/profundidade $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})$ ao longo dos dois canais mais importantes do estuário do Mondego. Na legenda SPemb e SDemb representaram respectivamente os sectores distal e proximal da embocadura, SDBN, SMBN, e SPBN simbolizaram os sectores distal, médio e proximal do braço norte, CRBM figurou o sector distal e proximal do troço estuarino do Canal regularizado do Baixo Mondego e SDBS, SMBS e SPBS definiram os sectores distal, médio e proximal do braço sul.

Entre os diferentes sectores fisiográficos dispostos longitudinalmente no canal principal do estuário foram identificadas diferentes tendências de variação deste parâmetro geométrico,

nomeadamente na embocadura, entre os sectores distal e proximal houve as maiores variações da profundidade média ocorrida entre os diferentes sectores fisiográficos em análise no estuário (figura 5.2. 8). Esta, contudo, foi representativa de um aumento relativo da batimetria para montante, de $\bar{h}_{SDemb,NMM}$=4.7m para $\bar{h}_{SPemb,NMM}$=7.6m, bem como, de um significativo estreitamento da largura média destes dois troços de canal, de $\bar{b}_{SDemb,NMM}$=376m da zona de expansão da ondulação para os $\bar{b}_{SPemb,NMM}$=168m. De acordo com Borrego *el al* (1995) este comportamento de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{x,emb}$ terá reflectindo localmente um comportamento hipso-síncrono da maré durante as fases da enchente (quadro 5.2. 3). A fisiografia do sector proximal da embocadura e dos três sectores do braço norte definiram um decréscimo irregular da batimetria para montante (de $\bar{h}_{SPemb,NMM}$=7.6m, para $\bar{h}_{SDBN,NMM}$=5.4m, para $\bar{h}_{SMBN,NMM}$=2.6m e para $\bar{h}_{SPBN,NMM}$=1.6m), acompanhado de um aumento da largura média (ou perímetro molhado) do canal principal, respectivamente de $\bar{b}_{SPemb,NMM}$=168m para $\bar{b}_{SDBN,NMM}$=292m para $\bar{b}_{SMBN,NMM}$=288m e para $\bar{b}_{SPBN,NMM}$=451m (quadro 5.2. 3). Van Rijn (1989) relaciona este tipo de comportamento em estuários semelhantes ao Mondego, com uma dissipação da energia da onda fundamentalmente relacionada com os fenómenos de amortecimento e também com um comportamento hipo-síncrono. A fisiografia das secções destes troços de canal já analisados, foi responsável pelo registo de variações muito semelhantes ocorridas quer na largura média, quer na profundidade média obtidas entre os três níveis da superfície livre em estudo, definindo $(\bar{b}_{NMM}-\bar{b}_{BMM})\approx(\bar{b}_{PMM}-\bar{b}_{NMM})$ e $(\bar{h}_{NMM}-\bar{h}_{BMM})\approx(\bar{h}_{PMM}-\bar{h}_{NMM})$.

O novo traçado do braço norte quando comparado com a anterior fisiografia traduziu-se num ligeiro incremento de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{BN}$, que reflectiu um aumento relativo da profundidade média e uma diminuição relativa da largura média do canal para os níveis médios da superfície livre em análise, como se ilustra na figura 5.2. 8, e se enumera no quadro 5.2. 5. Tomando como

exemplo o SPBN, a profundidade ostentou aumentos relativos de $\overline{h}_{SPBN,BMM}$=1.1m para os $\overline{h}_{SPBN,BMM,O}$=2.5m, de $\overline{h}_{SPBN,PMM}$=2.3m para os $\overline{h}_{SPBN,PMM,O}$=2.6m e de $\overline{h}_{SPBN,NMM}$=1.6m para os $\overline{h}_{SPBN,NMM,O}$=2.1m. A variação da largura foi representada por decréscimos relativos de $\overline{b}_{SPBN,BMM}$=359m para $\overline{b}_{SPBN,BMM,O}$=234, de $\overline{b}_{SPBN,NMM}$=451m para $\overline{b}_{SPBN,NMM,O}$=399m e de $\overline{b}_{SPBN,PMM}$=495m para os $\overline{b}_{SPBN,PMM,O}$=466m. Os sectores do canal mais profundos passaram a estar confinados ao leito menor e os ambientes intermareais representados fundamentalmente pelos fundos do leito maior, mais amplos e confinados a uma pequena variação de cotas batimétricas (figuras 5.2. 3 e 5.2. 4). Estes canais de topografia muito regular, definiram um decréscimo gradual da batimetria para montante que foi mais pequeno de que o aumento registado da largura média do canal principal e concordante com um comportamento igualmente hipo-síncrono. Este, terá sido de menor magnitude em resultado de o novo traçado do canal passar a ser mais geométrico, caracterizado por um nivelamento batimétrico longitudinal, a que esteve associada uma maior altura da coluna de água apenas nas zonas do leito menor. Acresceu a ausência de quaisquer macro-estruturas intermareais de fundo que possam ter causado obstrução e distorção dos escoamentos no canal, que se traduziram estas características fisiográficas em conjunto, num decréscimo da importância relativa por parte do atrito de fundo, à semelhança do considerado por Wiberg & Smith (1987), Stacey *et al* (1999), Tolhurst *et al* (1999) e Alexander *et al* (2001). Esta fisiografia adoptada também foi responsável por um decréscimo significativo da variação da profundidade média do braço norte, passando a definir amplitudes de variação que foram apenas da ordem dos $\overline{h}_{SPBN,PMM,O} - \overline{h}_{SPBN,BMM,O} \approx 0.1$m, quando anteriormente atingiam os $\overline{h}_{SPBN,PMM} - \overline{h}_{SPBN,BMM} \approx 1.1$m (quadro 5.2. 5).

Quadro 5.2. 5. Larguras e profundidades médias dos diferentes sectores fisiográficos do estuário, determinadas para as baixa-mares médias anuais (BMM), para o nível médio da variação da maré (NMM) e para as preia-mares médias (PMM), antes e durante os trabalhos de regularização do braço norte.

Levantamento batimérico do estuário de 1991:							**Levantamento batimérico do estuário de 1995:**					
Sectores fisiográficos	Para a BMM (η=1.2mZH):		Para o NMM (η=2mZH):		Para a PMM (η=2.8mZH):		Sectores fisiográficos	Para a BMM (η=1.2mZH):		Para o NMM (η=2mZH):		Para a PMM (η=2.8mZH):	
	Lm	**hm**	**Lm**	**hm**	**Lm**	**hm**		**Lm**	**hm**	**Lm**	**hm**	**Lm**	**hm**
SDEmb	347	4.2	376	4.7	398	5.2	**SDemb,O**	328	4.5	353	4.9	377	5.4
SPEmb	164	6.9	168	7.6	170	8.3	**SPemb,O**	162	6.9	165	7.6	167	8.3
SDBN	290	4.6	292	5.4	295	6.1	**SDBN,O**	289	4.7	291	5.5	292	6.3
SMBN	283	1.8	288	2.6	291	3.4	**SMBN,O**	273	2.4	284	3.1	290	3.8
SPBN	359	1.1	451	1.6	495	2.3	**SPBN,O**	234	2.5	399	2.1	466	2.6
CRBM	148	2.7	234	2.4	274	2.8	**CRBM,O**	148	2.7	234	2.4	274	2.8
SDBS	185	2.3	189	3.1	192	3.8	**SDBS**	185	2.3	189	3.1	192	3.8
SMBS	170	0.8	345	1.0	485	1.4	**SMBS**	170	0.8	345	1.0	485	1.4
SPBS	46	0.3	141	0.6	223	1.1	**SPBS**	46	0.3	141	0.6	223	1.1

O troço de canal do estuário do Mondego situado a montante dos Cinco Irmãos encontrava-se igualmente regularizado, apresentando uma fisiografia idêntica à enumerada anteriormente com uma secção transversal trapezoidal composta por um leito menor e um maior, e longitudinalmente descrita por um traçado muito rectilíneo e com uma batimetria muito nivelada (figuras 2.1 e 2.2). Relativamente ao troço de canal precedente (o SPBN), representou um decréscimo da largura média e um aumento relativo da profundidade média do canal principal, que eram mais significativos antes dos trabalhos de regularização do braço norte (quadro 5.2. 5). A relação $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_{CRBM}$ expressa na figura 5.2. 8, descreveu para este troço de canal mais proximal do estuário, ter sido caracterizado por um estreitamento da sua largura média mais acentuado ao decréscimo da batimetria ocorridos para montante, pelo que, terá sido responsável por um comportamento hipso-síncrono na propagação da onda de maré, onde os fenómenos de convergência terão dominado os relativos ao atrito de fundo, de acordo com van Rijn (1986), Borrego *el al* (1995) e Tonda (1999).

A conexão do sector proximal da embocadura para o sector distal do braço sul[9] realizou-se lateralmente ao canal principal fazendo uma transição para um troço de canal muito menos profundo e ligeiramente mais estreito, definido por mudanças médias de $\bar{h}_{SPemb,NMM} \approx 7.6m$ para os $\bar{h}_{SDBS,NMM} \approx 3.1m$ e de $\bar{b}_{SPemb,NMM} \approx 165m$ para os $\bar{b}_{SDBS,NMM} \approx 189m$ (quadro 5.2. 5). Contudo, este sector distal do braço sul representou um troço de canal muito pouco profundo, caracterizado por

[9]. Confluência por onde entra a maré para este subsistema periférico do canal principal do estuário.

um decréscimo muito gradual da batimetria para montante, com uma secção transversal do tipo trapezoidal simples, regularizada de largura muito constante (quadros 2.1 e 2.2). O gradiente longitudinal gerado de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_x$ foi representativo de um decréscimo significativo da profundidade média, que foi muito superior ao ocorrido com a largura (figura 5.2. 8 e quadro 5.2. 3) e consequentemente relacionado com um comportamento hipo-síncrono da maré ao longo de todo este sector distal do braço sul e um domínio do atrito de fundo nos fenómenos distorcivos. Os sectores médio-proximal do braço sul apresentaram uma variação fisiográfica mais complexa, definindo um troço de canal com um desenvolvimento longitudinal curvilíneo, de largura e batimetria tendencialmente decrescente para montante, dominados por ambientes intermareais. Relativamente ao sector distal, o sector médio constituiu um canal muito mais amplo, e menos profundo (quadro 5.2. 5). A análise da variação de $(\Delta\bar{h}/\Delta\bar{b})_x$ ocorrida ao longo dos sectores médio-proximal do braço sul, permitiu constatar que a variação da largura dos canais foi muito superior à acontecida com a profundidade média, e que à semelhança de Borrego *el al* (1995) pode ser relacionada com um comportamento hipso-síncrono por parte da maré, onde os fenómenos distorcivos relacionados com a convergência terão tido uma magnitude superior ao atrito de fundo. Contudo, o facto de estes sectores fisiográficos terem sido muito pouco profundos e intermareais, leva a presumir a ocorrência de tensões elevadas resultantes da interacção das correntes da maré com o fundo do estuário (Dyer, 1986).

Quando comparadas estas tendências de variação da superfície livre inferidas apartir da análise da variabilidade fisiográfica do estuário com as tendências de variação da superfície livre definidas apartir das constituintes harmónicas determinadas por Baptista (1990) apresentadas no item 3.2 e analisadas no item 5.1, verificou-se que ambos os métodos definiram comportamentos por parte da maré concordantes entre si. As estações maregráficas 4, 3 e 2 enquadradas no canal principal, respectivamente nos sectores distal e proximal do braço norte e no início do CRBM, definiram igualmente entre si um comportamento hipo-síncrono da altura da maré, como

também a estação 1 localizada na parte central do CRBM ostentou um comportamento hipso-síncrono (figura 5.1.2). No braço sul, a estação 5 localizada no sector médio, num estreito canal sempre imerso (ASP) apontou também para um comportamento hipso-síncrono.

5.2.2.3 Parâmetros Adimensionais

Para além do atrito de fundo, autores como Speer & Aubrey (1985), Aubrey (1986), Speer *el al* (1991) e Dyer (1997) relacionam a distorção da maré com a presença de barras intermareais, de planícies de inundação e de áreas de sapal, como sendo responsáveis por condicionar a relação acontecida entre o volume de água no estuário e o nível da superfície livre (princípio da continuidade). Consideram que as cotas destes ambientes intermareais vão determinar a alteração do volume de água necessário para inundar um estuário não estratificado, atrasando as respectivas preia-mares. Este atraso da maré será tanto maior, quanto maior for a alteração da secção em causa e a magnitude dos fenómenos de atrito associados.

Parâmetro Geométrico e Ambientes Intermareais

Vários têm sido os modelos propostos com a finalidade de quantificar o efeito distorcivo gerado pela fisiografia dos ambientes intermareais, relacionado quer com a topografia das macro-formas de fundo, quer com as áreas dos ambientes de sapal, responsáveis pela retenção de água durante as fases de maior altura da coluna de água[10]. Na tentativa de dar resposta a este problema, Speer & Aubrey (1985), Aubrey (1986) e Speer *el al* (1991) definiram e adoptaram o parâmetro geométrico (V_s/V_c), representativo da relação ocorrida entre a componente do prisma de maré restrita às zonas intermareais (V_s) com a componente sobrejacente à parte sempre

[10]. As zonas intermareais, principalmente as áreas de sapal, apresentam uma grande capacidade de retenção e armazenamento de água, que é máximo durante as preia-mares. Nas fases finais da enchente, estas zonas intermareais, são responsáveis por um amortecimento da corrente. Quando a maré começa a vazar, a água que cobre as zonas de sapal é retida pela vegetação. Estes ambientes condicionam consideravelmente a hidrodinâmica estuarina destes sectores.

submersa do canal (V_c). Contudo, este método muito citado na literatura da especialidade apresenta uma grande dificuldade prática em diferenciar os volumes V_s dos V_c.

Tendo por finalidade evidenciar o efeito distorcivo gerado pelos ambientes intermareais e também realçar a componente da distorção da onda de maré induzida pela fisiografia, propõe-se neste trabalho o parâmetro (P/V_{BM}). Este relaciona os volumes de água que inundam os domínios intermareais, com os volumes que ocupam os domínios imersos aquando da BM, dos troços de canal localizados imediatamente antes e/ou depois de uma secção recta estuarina em estudo.

As relações de volumes determinadas quer a montante, quer a jusante de uma estação do estuário, também reflectem as relações fisiográficas ocorridas nos respectivos troços dos canais. Desta forma, a fisiografia do troço de canal localizado a jusante da secção recta em estudo, vai condicionar a distorção da maré medida nesta estação apenas durante a fase da enchente, enquanto a fisiografia do troço de canal localizado a montante, vai interagir com os escoamentos de vazante, que por sua vez são registados na estação.

É definido por um quociente entre o prisma de maré (P) e o volume dos ambientes imersos aquando da baixa-mar (V_{BM}). Este parâmetro relaciona canais pouco profundos com efeitos distorcivos mais elevados. Associa magnitudes de (P/V_{BM}) próximas da unidade, a sectores do estuário dominados por ambientes intermareais, e magnitudes de (P/V_{BM}) a tender para zero em sectores mais profundos, em que a interferência das formas do fundo se dilui na coluna de água, e apenas se reflecte na camada limite de fundo.

Uma vez que a distorção da maré, que é medida num determinado sector do estuário, reflecte as componentes harmónicas de baixa profundidade produzidas nos troços de canal adjacentes percorridos pelos escoamentos, torna-se da maior importância apenas relacionar a fisiografia dos ambiente intermareais localizados a montante desse sector, com a distorção medida nos escoamentos durante as fases da vazante ou na BM, enquanto apenas os aspectos fisiográficos do troço de canal situado a jusante desse local regulam os fenómenos distorcivos

que ocorrem durante as fases da enchente ou na PM. Pelo que, se relacionam no subcapítulo 5.3.5 deste trabalho, as distorções dos escoamentos medidas na PM ($Ø_{PM}$) com as magnitudes do parâmetro (P/V_{BM}) referentes às fases da enchente dos sectores localizados imediatamente a jusante da estação em estudo, assim como, se relacionam as distorções aferidas na BM ($Ø_{BM}$) com as magnitudes do parâmetro (P/V_{BM}) referentes ao sector fisiográfico localizado a montante da estação. Com este procedimento metodológico a avaliação da componente da distorção relacionada com a fisiografia passa também a entrar em consideração com eventuais variações morfológicas e batimétricas consideráveis que possam ocorrer nas diferentes secções do estuário. A delimitação para montante e jusante das zonas de influência de distorção fisiográfica de cada estação do estuário do Mondego teve assim por base a determinação da distância média longitudinal percorrida por cada fase da maré, considerando respectivamente as velocidade médias longitudinais e os respectivos períodos médios das fases da enchente e da vazante, determinados apartir das várias séries de registos maregráficos.

Desta forma, a estação da Embocadura (Emb) localizada entre o sector proximal da embocadura e o distal do braço norte enquadrou-se numa parte do estuário com uma fisiografia regularizada. Para a distorção representativa da enchente foi considerado o parâmetro $(P/V_{BM})_{Emb}$ representativo da variação da superfície livre nos sectores distal-proximal da embocadura, enquanto que para a vazante considerou-se o efeito distorcivo por parte dos ambientes intermareais de todo o braço norte. Já a estação da Gala separa o braço sul em dois troços de canal com características fisiográficas distintas, demarcando o sector distal dos sectores médio-proximal. As magnitudes do parâmetro $(P/V_{BM})_{SDBS}$ referente ao primeiro sector fisiográfico definiram a componente da fisiografia interveniente nas distorções da enchente nesta estação, enquanto os valores de $(P/V_{BM})_{SMBS+SPBS}$ terão condicionado as distorções dos escoamentos durante as fazes da vazante. A estação dos Cinco Irmãos (5I), antes das obras de regularização do braço norte, separava o troço proximal deste braço do troço CRBM, que era definido o

primeiro por extensos ambientes intermareais, enquanto o segundo apresentava uma fisiografia regularizada do tipo trapezoidal composta. Após a reconversão do braço norte para uma fisiografia de continuidade do troço CRBM, esta estação passou a estar enquadrada num troço de canal com características morfológicas e batimétricas semelhantes. Considerou-se que as distorções medidas nesta estação na PM foram condicionadas pela fisiografia do braço norte, enquanto as distorções da BM com a fisiografia do sector distal do CRBM. A estação Elevatória (EE) localizou-se no CRBM, enquadrando-se num troço de canal com uma fisiografia muito semelhante a montante e a jusante.

Na tentativa de melhor representar os efeitos distorcivos gerados nos escoamentos pelo fundo e pelas margens dos canais nas diferentes estações, também se propõe o parâmetro P/V_{BM} que relaciona os volumes referentes ao prisma de maré com os volumes sempre imersos do mesmo. Este parâmetro adimensional determina para sectores pouco fundos do estuário uma magnitude elevada (>1) representativa de um maior retardamento dos escoamentos pelo fundo. Quanto maior for a amplitude da maré também maiores serão as tensões resultantes da interacção das correntes de maré com o fundo do estuário. Para sectores do estuário profundos a relação P/V_{BM} determina uma magnitude ≤1 representativa de uma menor interacção dos escoamentos com a topografia do fundo e consequentemente um menor atrito. Este adquire magnitudes próximas de zero sob marés de pequena amplitude.

5.2.3. Unidades Fisiográficas

Analisando as semelhanças morfológicas e as variações batimétricas observadas entre os diferentes troços de canal dispostos longitudinalmente ao estuário do Mondego, coligadas sempre que possível aos principais comportamentos de variação da superfície livre relacionados, foi possível agrupar vários desses troços de canal e desta forma definir várias unidades fisiográficas. Assim, antes da regularização do braço norte, a embocadura e todo o braço norte

foram englobados numa única unidade, muito embora as diferenças morfológicas observadas nos sectores médio-proximal do braço norte. Todo o CRBM constituiu outra unidade.

O braço sul definiu uma terceira unidade fisiográficas, muito embora as características fisiográficas e hidrodinâmicas dos sectores médio e proximal tenham sido diferentes das do sector distal. Quando o braço norte passou a apresentar uma fisiografia de continuidade relativamente ao CRBM e também a definir relativamente à embocadura um canal tendencialmente mais largo e gradualmente menos profundo para montante, tendo sido enquadrado num único troço fisiográfico representado pelo canal principal, realçando desta forma o facto de todo o seu traçado longitudinal ter passado a estar completamente regularizado. O braço sul continuou a definir uma outra unidade.

Subcapítulo 5.3. Hidrodinâmica e Circulação no Estuário

Para melhor estudar e compreender a circulação e os principais processos de mistura que caracterizam estuário do Mondego, procedeu-se à medição e análise de séries de dados representativas quer de variações temporais de velocidade, temperatura, salinidade e de densidade em diversos ambientes deste sistema, quer de variações longitudinais destes parâmetros ao longo dos principais canais, abrangendo diferentes quadros hidrodinâmicos de altura de maré e de descargas fluviais, à semelhança do proposto por Miranda *et al* (2002).

5.3.1. Massas de Água, Mistura e Estratificação

A dinâmica, a estratificação da densidade e os processos de mistura encontram-se fundamentalmente condicionados pela fisiografia do estuário (morfologia, batimetria, comprimento, largura, etc.), pela maré, pela dinâmica da zona costeira adjacente, pela salinidade, pelas descargas de água doce e pelo vento que actua directa ou indirectamente sobre a sua superfície livre (Pritchard, 1952; Bowden, 1978). A actuação conjugada das descargas fluviais, das correntes de maré, do gradiente horizontal de pressão, dos fenómenos de advecção e difusão turbulenta, vão definir um padrão de distribuição da salinidade (ou da densidade) que vai corresponder a uma assinatura específica de cada estuário (Officer, 1983 *in* Miranda *et al*, 2002; Dippner, 1987; Darbyshire & West, 1992).

5.3.1.1. Massas de Água e Domínios do Estuário

O estuário do Mondego pode ser considerado um corpo de água costeiro de pequenas dimensões, parcialmente fechado com uma abertura para o Oceano Atlântico, onde a água do mar sofreu diluição por parte das descargas dos rios Mondego e do Pranto. Esta diluição terá resultado fundamentalmente da mistura das massas de água fluvial com a marinha, à semelhança do considerado por Sanford *et al* (1992) e Luketina (1998), para sistemas costeiros similares. Entendeu-se por massas de água fluvial e marinha, corpos líquidos definidos por algumas propriedades físicas constantes ao longo da escala de tempo da amostragem, mas representadas por

alguma variabilidade sazonal. Assim, as massas de água marinha e fluvial dos troços inferior e superior do estuário foram consideradas como corpos de água com temperaturas e salinidades homogéneas, mas susceptíveis de uma variação temporal lenta, à semelhança do também considerado por Kreeke (1992) e Officer & Kester *in* Miranda *et al* (2002). As águas resultantes da mistura das anteriores massas de água no interior do estuário foram definidas por um leque de variações daquelas propriedades físicas.

À semelhança de Kjerjve (1987), de Fairbridge *in* Brown *et al* (1989), e Dyer (1997) o domínio superior ou fluvial do estuário (ZF) localizou-se na parte mais proximal do estuário e foi definida apenas por água doce (com salinidade nula), mas sujeita à oscilação da maré com movimentos unidireccionais para cima e para baixo segundo o seu desenvolvimento longitudinal. Por ser constituída inteiramente por água doce, permitiu definir a massa de água fluvial. Este domínio, ocupou a parte superior do estuário e foi definido superiormente pelo alcance da maré dinâmica e inferiormente pelo alcance da maré salina. Desta forma tornou-se possível caracterizar a massa de água fluvial que condicionou o estuário, tendo por base a análise das propriedades dos escoamentos registados na estação Elevatória, apenas durante as fases da vazante e que se representam na figura 5.3.1. 2.b. Para além de ter sido definida por salinidades nulas, foi demarcada por temperaturas da água que oscilaram entre os 11.8ºC e os 24.7ºC e densidades entre os $-2.87 \leq \sigma_{t,Mondego} \leq -0.46 kg/m^3$, respectivamente em Dezembro e em Agosto de 1993 (figura 5.3.1. 2.b). Como não foram registados escoamentos de vazante com salinidade nula em toda a coluna de água na estação da Gala, não foram determinadas as amplitudes de variação destes parâmetros para a massa de água proveniente do rio Pranto (figura 5.3.1. 1.b).

A massa de água marinha foi definida por densidades relativas mais elevadas e por uma menor amplitude de variação sazonal da temperatura. Esta apresentou uma variação de magnitudes apenas compreendidas entre os $12.9 \leq T_{Mar} \leq 17.3$ºC, traduzindo à semelhança da massa de água fluvial, temperaturas mais elevadas durante a época estival e as mais baixa no Inverno. Esta massa de água

da zona costeira adjacente à foz do estuário foi também caracterizada por variações de salinidade compreendidas entre os $30 \leq S_{Mar} \leq 34.9‰$ a que corresponderam variações de densidade de $22.1 \leq \sigma_{t,Mar} \leq 26.4 kg/m^3$, como se ilustra nos gráficos das figuras 5.3.1. 1.a e 5.3.1. 4a. Por limitações logísticas, estes parâmetros foram obtidos nas zonas de espraio das praias adjacentes à boca do estuário, designadamente em diversos locais das praias da Gala, da Figueira da Foz e de Buarcos, em datas contíguas às campanhas de campo realizadas nas quatro estações do estuário. Considerando que estes escoamentos foram representativos da massa de água marinha em circulação na zona costeira adjacente à foz do estuário, foi possível à semelhança do proposto por Kjerjve (1987) e por Fairbridge *in* Brown *et al* (1989) delimitar o domínio dinâmico marinho (ZC) no interior do estuário. Este domínio serviu de interface ao oceano aberto, e foi definido por uma massa de água de origem oceânica, com salinidades enquadradas nos $30 \leq S \leq 34.9‰$ e densidades nos $22.1 \leq \sigma_t \leq 26.4 kg/m^3$ e por um domínio hidrodinâmico por parte da maré. Este sector, designado de estuário inferior, terá apresentado também uma dinâmica muito dependente das correntes costeiras e da agitação marinha.

Autores como Darbyshire & West (1992) e Officer, 1983 *in* Miranda *et al* (2002) relacionam os fenómenos de mistura no interior de estuários de reduzidas dimensões e pouco profundos (semelhantes ao Mondego) com a actuação conjugada dos caudais fluviais, das correntes de maré, do gradiente de pressão, dos fenómenos de advecção e da difusão turbulenta que vão definir o padrão de distribuição da densidade, que por sua vez vai corresponder a uma assinatura específica de cada estuário . Consideram que o movimento das massas de água fluvial e marinha vai originar que as temperaturas e as salinidades características sejam alteradas fundamentalmente pelos processos de mistura de natureza turbilhonar e/ou de difusão salina no interior do estuário, comportando-se como propriedades conservativas. Desta forma, as diferentes massas de água em jogo no estuário podem ser identificadas pelas combinações ocorridas entre a temperatura e a salinidade características, muito embora também apresentem outras propriedades físicas, químicas,

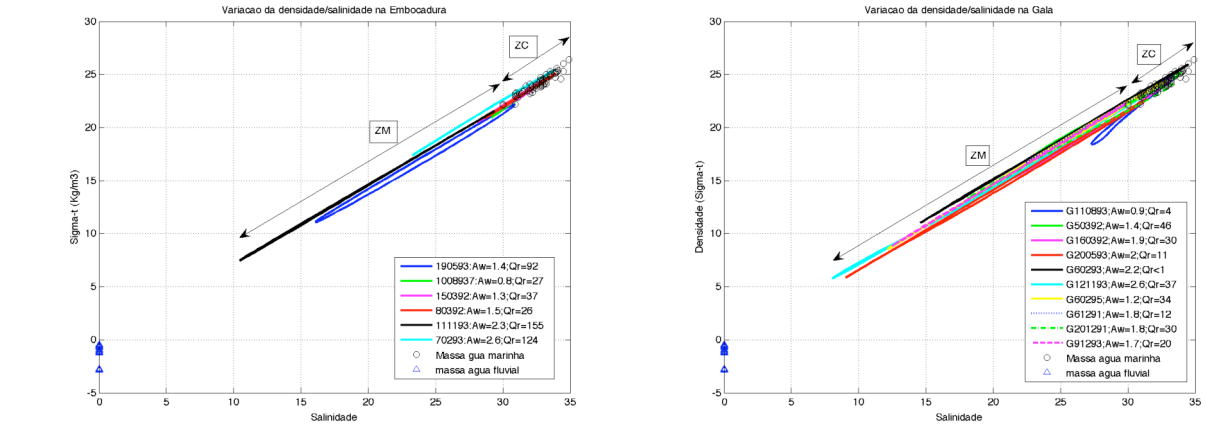
biológicas ou sedimentológicas, mas de carácter não conservativo (Dippner, 1987). Consideraram que as proporções desta mistura variam longitudinalmente aos canais do estuário, bem como ao longo do tempo, descrevendo uma massa de água estuarina que também pode ser designada de massa de água de mistura. A localização desta massa de água no estuário define a zona de mistura (ZM) de acordo com Kjerjve (1987) e Fairbridge *in* Brown *et al* (1989), mas para o caso do estuário do Mondego abrange os sectores com salinidades (ou densidades) médias na coluna de água compreendidas entre os $0 \leq S \leq 30‰$ e/ou $21.1 \leq \sigma_t \leq 26.4 kg/m^3$.

Variações de Densidade

Pretendeu-se determinar qual ou quais as propriedades físicas em estudo que mais condicionaram as variações da densidade dos vários ciclos de maré, aferidos nos diferentes sectores do estuário. Para tal, relacionaram-se as magnitudes da densidade dos escoamentos expressas sob a forma de sigma-t (σ_t) nas 4 estações do estuário, com as respectivas variações da temperatura e da salinidade. Nas estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos obtiveram-se regressões directas e proporcionais, significativas apenas entre σ_t com a salinidade de acordo com os dois gráficos da figura 5.3.1. 1 e o gráfico b) da figura 5.3.1. 2. Estas mostraram que mais de 99.5% da variabilidade de σ_t nas três estações foi explicada pela variação da salinidade, comprovando que a densidade da água salobra ou marinha neste sistema costeiro se encontrou primeiramente relacionada com a salinidade da água, tal como comprovado por exemplo por Hansen & Rattray, 1966 *in* Unesco (1992).

Comparadas as amplitudes de variação de σ_t registadas nas estações da Embocadura e Gala verificou-se que foram muito similares entre si, por terem apresentado magnitudes compreendidas entre os $7.5 \leq \sigma_{t,Emb} \leq 25.4 kg/m^3$ e os $5.8 \leq \sigma_{t,Gala} \leq 25.9 kg/m^3$, para salinidades respectivamente compreendidas entre os $10.5 \leq \overline{S}_{Emb} \leq 33.8‰$ e $8 \leq \overline{S}_{Gala} \leq 34.5‰$. Contudo, na primeira estação esta amplitude de variação de $\sigma_{t,Emb}$ reflectiu uma maior variação da magnitude das descargas do

Mondego, que foram compreendidas entre os $26 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, enquanto na estação do braço sul reproduziu apenas caudais inferiores a $Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$ provenientes do rio Pranto, uma vez que ambas decorreram sob $0.9 \leq A_w \leq 2.6m$.

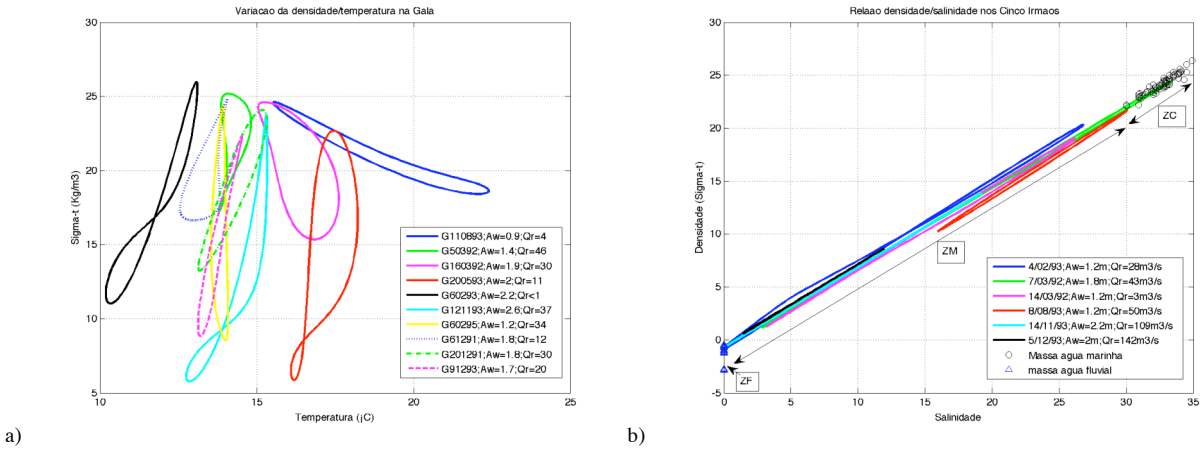


a) b)

Figura 5.3.1. 1. Variações da densidade (σ_t) dos escoamentos determinadas em função da salinidade medida nos diferentes ciclos de maré aferidos nas estações: a) da Embocadura, b) da Gala. Foram obtidas duas regressões significativas descritas respectivamente por: $\sigma_{t,Emb}=0.7597*S_{Emb}-0.743$, com $r^2_{Emb}=0.995$, $r_{Emb}=0.998$, $p<0.01$, $N_{Emb}=956$, e por $\sigma_{t,Gala}=0.7599*S_{Gala}-0.5946$, com $r^2_{Gala}=0.996$, $r_{Gala}=0.998$, $p<0.01$, $N_{Gala}=1445$. Nas ordenadas encontra-se projectada a densidade dos escoamentos sob a forma de sigma-t e expressa em kg/m^3, enquanto em abcissas a salinidade dos escoamentos expressa em ‰. Na legenda A_w representou a altura da maré expressa em metros e Q_r a magnitude média das descargas fluviais, expressa em m^3/s.

Para descargas do Mondego com a mesma ordem de grandeza das do Pranto, com $Q_{r,Mond} \leq 37 m^3/s$ e marés mortas de $0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 1.5m$, passaram-se a registar amplitudes de variação da densidade de apenas $20.5 \leq \sigma_{t,Emb,Qr \leq 37m3/s} \leq 24.4 kg/m^3$ e salinidades de $28 \leq \overline{S}_{Emb,Qr \leq 37m3/s} \leq 32.9$‰ na Embocadura. Comparativamente à Gala, estes resultados reflectiram uma maior influência da maré na estação da Embocadura e realçaram um carácter periférico e de forte mistura no braço sul. Para maiores descargas do Mondego (compreendidas entre os $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$) e sob marés vivas (de $2.3 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6m$), as amplitudes de variação registadas foram da ordem dos $7.5 \leq \sigma_{t,Emb} \leq 25.4 kg/m^3$ e dos $10.5 \leq \overline{S}_{Emb} \leq 33.8$‰, que comparativamente às anteriores traduziram amplitudes de variação relativas muito superiores, relacionadas com uma ainda maior influência da maré no sector distal do CP, e com uma maior estratificação em resultado de descargas do Mondego muito superiores às do Pranto.

No gráfico b) da figura 5.3.1. 2 apresentam-se as variações da densidade *versus* salinidade registadas nos escoamentos na estação dos Cinco Irmãos. Da análise deste gráfico foi possível determinar para as condições hidrodinâmicas estudadas, que a amplitude de variação da densidade esteve compreendida entre os $-0.7 \leq \sigma_{t,5I} \leq 24.5 kg/m^3$ para variações de salinidade de $0 \leq \overline{S}_{5I} \leq 33.4‰$. Daquela, verificou-se que as densidades mais elevadas e com as maiores amplitudes de variação de $\sigma_{t,5I}$ tiveram lugar aquando de marés vivas sob descargas baixas a moderadas do Mondego (5I70392), enquanto sob marés vivas e descargas do Mondego elevadas (5I141193 e 5I51293) registaram-se as menores amplitudes de variação de $\sigma_{t,5I}$, bem como as densidades relativas mais baixas que foram representativas de salinidades praticamente nulas e consequentemente de um recuo da maré salina até este sector do canal principal. Sob marés mortas e descargas reduzidas do Mondego (5I80893) foram registadas amplitudes de variação de $\sigma_{t,5I}$ pequenas, mas com magnitudes relativas da densidade das mais elevadas, o que representou um maior alcance da maré salina para montante.



a) b)

Figura 5.3.1. 2. No gráfico a) encontram-se representadas as variações da densidade *versus* temperatura registadas na estação da Gala. No gráfico b) ilustram-se as variações da densidade (σ_t) dos escoamentos determinadas em função da salinidade (S) medida nos diferentes ciclos de maré na estação dos Cinco Irmãos. A regressão significativa obtida neste último gráfico foi descrita por: $\sigma_{t,5I}=0.7459*S_{5I}-0.6153$, com $r^2_{5I}=0.997$, $r_{5I}=0.998$, $p<0.01$, $N_{5I}=826$. Na legenda, A_w representou a altura da maré expressa em metros e Q_r a magnitude média das descargas fluviais, expressa em m^3/s. Nestes dois gráficos em ordenadas encontra-se projectada a densidade dos escoamentos sob a forma de sigma-t e expressa em kg/m^3, enquanto em abcissas a temperatura expressa em ºC no gráfico a) e a salinidade dos escoamentos expressa em ‰ no gráfico b).

A análise das tendências de variação da densidade registadas nestas três estações do estuário, permitiu verificar que houve uma grande analogia de comportamentos entre as duas estações do canal principal, e que estas foram contrastantes com a da estação da Gala. Estes resultados também apontaram para que tenha havido uma maior competição entre a maré e as descargas fluviais no CP, definida por um maior alcance da maré salina longitudinalmente para o interior do estuário, ao longo deste canal aquando de descargas do Mondego muito pequenas. Realçaram igualmente que as descargas do Mondego apenas condicionaram directamente o canal principal. O braço sul comportou-se como um canal de maré periférico caracterizado por uma forte mistura longitudinal e vertical entre a entrada de massa de água marinha com a de mistura residente no sector distal deste braço nas fases de BM, à semelhança do descrito em Bowden (1978) e Dyer (1997). Permitiram também determinar que a salinidade correspondeu à principal propriedade que regulou a densidade nos domínios marinho e de mistura do estuário. Estes resultados traduziram comportamentos distintos na variação da densidade (ou da salinidade) nestes dois canais mais importantes do estuário, que foram representativos de hidrodinâmicas distintas. Estas relacionaram-se fundamentalmente com diferentes interacções da propagação da maré e das descargas fluviais com a fisiografia destes dois braços definida por morfologias, cumprimentos e profundidades também desiguais. Para além destes dois agentes dinâmicos condicionantes do movimento e mistura da massa de água estuarina consideraram-se à semelhança de Speer *et al* (1991) e Tonda (2002), outras causas físicas como também tendo sido intervenientes mas com uma menor importância relativa, realçando as correntes não mareais de origem atmosférica, o transporte sedimentar em suspensão e as correntes costeiras. A agitação marinha terá condicionado também a dinâmica do sector distal do estuário, como estudado por Almeida (1991). A acção do vento sobre a parte superficial dos escoamentos em determinados sectores do estuário para além de ter gerado ondas e correntes de superfície, terá incrementando a mistura vertical e consequentemente causar a erosão dos gradientes verticais de salinidade, à semelhança do considerado por Dyer (1997). Nos

sectores médio-proximal do braço norte foram detectadas a formação de uma agitação superficial[1] registada durante algumas das campanhas (por exemplo na estação dos Cinco Irmãos), que terá fomentado os processos de mistura nestes sectores que são abrangentes da zona de mistura aquando das fases da enchente. Este fenómeno foi observado aquando de ventos dominantes costeiros, frequentemente marcados por uma variação sazonal, e correntes estuarinas com sentidos de propagação praticamente opostos.

Variações de densidade também puderam ter estado relacionadas com perdas e ganhos de calor, de sal, ou de água doce, originadas pela chuva, radiação solar e por outras influências externas. Destas realça-se o registo na estação da Gala de um decréscimo da densidade da massa de água de mistura causado por um aumento relativo da temperatura ocorrido durante o ciclo de maré G110893, conforme se mostra no gráfico b) da figura 5.3.1. 1. Este fenómeno teve lugar sob uma maré morta, debaixo de caudais do pranto praticamente nulos e sob um período de forte insolação (época estival), que terá propiciado um aquecimento dos escoamentos em parte relacionado quer por insolação do extenso espelho de água muito pouco profundo formado nos sectores médio-proximal do braço sul sob estas condições de baixo hidrodinamismo, quer com o aquecimento dos sedimentos lutíticos ricos em matéria orgânica (de cor escura) que cobriam os ambientes intermareais que dominaram aqueles sectores. As relações ocorridas entre a densidade e a temperatura na estação da Gala encontram-se representadas no gráfico a) da figura 5.3.1. 2, determinando para o ciclo de maré G110893 um comportamento distinto das restantes séries de dados. Também realçou que este ciclo apresentou densidades relativas dos escoamentos mais elevadas durante a fase da enchente e mais baixas na vazante após ter sofrido um aumento relativo da sua temperatura nos sectores médio-proximal do braço sul, conforme diagrama TS da figura 5.3.1. 6.

[1]. Designada localmente de carneirada.

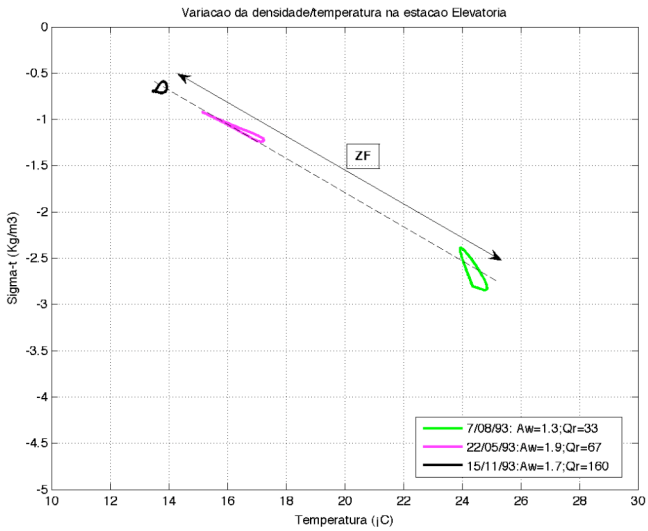


Figura 5.3.1. 3. Variações da densidade em função da temperatura registadas na estação Elevatória. A regressão obtida foi descrita por $\sigma_{t,EE}$=-0.004*T_{EE}+0.6073, com r^2_{EE}=0.991, r_{EE}=0.996, p<0.01, N_{EE}=433. Na legenda A_w representou a altura da maré expressa em metros e Q_r a magnitude média das descargas do Mondego, expressa em m^3/s.

Na estação Elevatória registou-se uma regressão inversa e proporcional, significativa unicamente entre $\sigma_{t,EE}$ e a variação da temperatura, tendo aquela sido explicativa de 99% da variabilidade da densidade como se representa no gráfico da figura 5.3.1. 3. As séries de dados obtidas nesta estação que permitiram a aplicação da análise harmónica encontram-se expressas nesta figura e permitiram descrever amplitudes de variação da densidade compreendidas entre os $-2.8 \leq \sigma_{t,5I} \leq -0.6 kg/m^3$ para variações de temperatura enquadradas entre os $24.9 \geq \overline{S}_{5I} \geq 13.4‰$. Estas variações definiram em grande parte a massa de água do Mondego, que durante a época estival apresentou as densidades mais baixas e as temperaturas relativas mais elevadas, enquanto durante o Inverno ostentou as densidades relativas mais elevadas definidas apartir das temperaturas de menor magnitude. Desta forma a temperatura passou a ser a principal propriedade a regular a densidade nesta estação localizada no sector dinâmico da maré e no domínio fluvial do estuário, que apenas foi identificado neste sector mais proximal do canal principal.

5.3.1.2. Mistura e Estratificação

A intrusão salina no estuário tende a ser neutralizada com a mistura vertical resultante dos movimentos turbulentos dos escoamentos que ocorre nas zonas de interface (Yanagi *et al*, 1992). A

intensidade de mistura na massa de água estuarina para além do tipo de regime dos escoamentos, também depende da estabilidade vertical ocorrida na interface das camadas em movimento de densidade distinta, estando a intensidade da turbulência a controlar a distribuição vertical das propriedades físicas na coluna de água. Esta competição acontecida entre a estratificação vertical e a intensidade de mistura vai condicionar fortemente toda a dinâmica estuarina, uma vez que segundo Bowden (1978) e Mied *et al* (2000) o gradiente da densidade (ou salinidade) opõe-se à mistura vertical dos escoamentos (uma vez que o movimento do fluido mais denso vai de encontro à acção da gravidade) e torna-se necessária segundo estes autores uma fonte adicional de turbulência para causar mistura vertical num estuário. Pode-se, desta forma, considerar de acordo com Chant & Wilson (2000), que a distribuição e mistura da massa de água estuarina se encontra em estreita relação com a competição local e temporal ocorrida entre os processos de arrastamento, de difusão turbulenta, e os advectivos, responsáveis pela concentração ou diluição da salinidade ou de outras propriedades físicas, alterando a distribuição da salinidade, gerando gradientes verticais e longitudinais de densidade. De acordo com Bowden (1977) e Dyer (1973) os diferentes processos de mistura decorrentes num estuário podem ser detectados apartir das leituras da salinidade locais, uma vez que as diferentes diluições ou concentrações são traduzidas respectivamente pela contribuição das massas de água fluviais ou das marinhas. Para representar a competição ocorrida entre os regimes fluviais e maré recorreu-se à razão de fluxo (R/P) relacionando os volumes fluviais descarregados no estuário durante um ciclo de maré e o correspondente prisma de maré, de acordo com Simmons, 1955 *in* Dyer (1997).

Uma vez que a variabilidade do grau de mistura e da estratificação vertical da salinidade no estuário do Mondego foi definida por um quadro de distribuição muito complexo, variando quer longitudinalmente aos dois canais mais importantes do sistema, quer ao longo do tempo, optou-se por classificar este sistema com base em dados hidrográficos de diferentes locais e representativos da variabilidade temporal dos principais agentes hidrodinâmicos interveniente, há semelhança do

considerado por Yanagi *et al* (1992) ou por Uncles *et al* (1999). Para tal, mediram-se e analisaram-se parâmetros físicos (velocidade, temperatura, salinidade e densidade) em quatro estações do estuário abrangendo ciclos de maré viva, morta e diversos regimes fluviais, bem como procederam-se a perfis longitudinais dos mesmos parâmetros ao longo dos canais mais importantes deste sistema, em fases terminais da enchente e da vazante. À semelhança de Tonda (1999) e Miranda *et al* (2002) também se consideraram aspectos fisiográficos como condicionantes da intensidade de circulação e dos processos de mistura no estuário, tanto que o rio Mondego apenas drenou o canal principal, e o rio Pranto o braço sul.

Outras propriedades físicas podem também servir de indicadores de mistura da massa de água estuarina, nomeadamente a energia cinética, a quantidade de calor, o transporte salino, a circulação de contaminantes (Bowden, 1978), muito embora algumas delas possam também ser conservativas e ser analisadas da mesma forma que a água doce que é introduzida no estuário pelas descargas dos rios Mondego e Pranto, não foram estudadas no âmbito deste trabalho.

Estratificação

Um método simples e expedito muito usado na literatura da especialidade para quantificar o grau de mistura e simultaneamente o grau da estratificação, corresponde ao parâmetro de estratificação (n_S) que descreve não só o gradiente vertical da salinidade mas também o gradiente da densidade na coluna de água, uma vez que a densidade da água salobra ou marinha nestes sistemas costeiros encontra-se primeiramente relacionada com a salinidade (Hansen & Rattray, 1966 *in* Unesco, 1992). O efeito da estratificação e mistura dos fluidos foi avaliado pelo número de Richardson (R_i) com o objectivo de quantificar a capacidade de produção de turbulência do sistema através da relação verificada entre o módulo do gradiente vertical de densidade ($\partial\rho/\partial z$) (que simbolizam as forças estabilizadoras do gradiente) com as desequilibradoras representadas pelo gradiente da velocidade ($\partial u/\partial z$) que produz turbulência (Unesco, 1992). Para definir o efeito produzido pelas descargas fluviais na estratificação horizontal da densidade no estuário recorreu-se

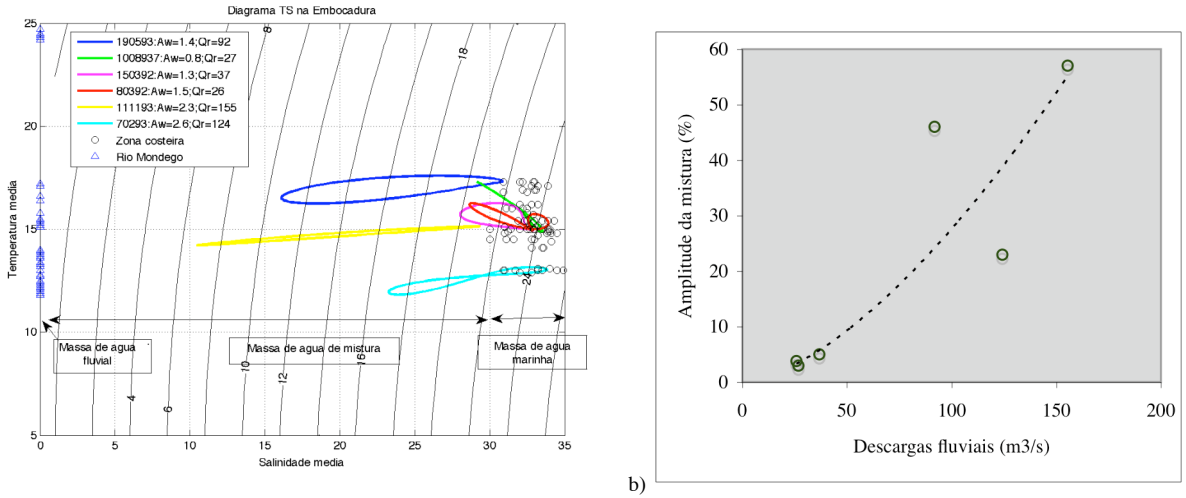
ao número de Richardson estuarino (R_{iE}) proposto por Fisher, 1972 *in* Miranda *et al* (2002), que relacionou o ganho de energia potencial relacionado com as descargas fluviais, com a capacidade de mistura das correntes de maré[2].

Diagramas T-S

Elaborado o diagrama TS com os diferentes ciclos de maré registados na estação da Embocadura conforme o gráfico da figura 5.3.1. 4, verificou-se após a sua análise, que sob marés mortas de $A_{w,Emb}$≤1.5m e descargas reduzidas do Mondego com $Q_{r,Emb}$≤37m^3/s, a maioria das fases dos ciclos de maré de E80392, de E150392, e de E100893 foram representadas pela massa de água marinha, à semelhança de Bowden (1978). Nestes, atingiram-se os graus máximos de mistura de água doce na BM com magnitudes apenas da ordem dos 3%, 4% e 5%, respectivamente, tendo estes resultados sido representativos de uma clara influência da maré e do domínio marinho ZC neste sector distal do estuário. Sob marés mortas de $A_{w,Emb}$≈1.4m e caudais um pouco mais elevados da ordem dos $Q_{r,Emb}$≤92m^3/s (em E190593), verificou-se que a massa de água marinha restringiu-se às fases terminal da enchente, à PM e ao princípio da vazante, descrevendo nas restantes fases da maré quadros de mistura que atingiram ordens de grandeza máxima da ordem dos 46% de água doce na BM. Debaixo de marés vivas de amplitude máxima com $A_{w,Emb}$≈2.6m e descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}$≈124m^3/s (em E70293) constatou-se ter havido um aumento relativo da amplitude da mistura, tendo esta sido máxima por volta da BM, com uma magnitude que rondou os 23%. Neste contexto hidrodinâmico, a massa de água marinha ocupou cerca de um terço do ciclo de maré, enquadrando-se entre o final da enchente e o princípio da vazante. Já no ciclo de maré de E111193 que decorreu sob marés vivas de menor amplitude com $A_{w,Emb}$≈2.3m mas sob descargas do Mondego mais elevadas da ordem dos $Q_{r,Emb}$≈155m^3/s, constatou-se que a estação da Embocadura foi representada exclusivamente pela massa de água de mistura, tendo sido definida por índices de mistura de água doce da ordem dos 2% na PM e da ordem dos 65% nas proximidades da BM. Estes resultados obtidos na estação Embocadura, realçaram uma dinâmica fortemente condicionada pelas

[2]. Considerando a energia cinética da maré proporcional à velocidade de natureza barotrópica (variação da superfície livre).

descargas do Mondego aquando de magnitudes de $Q_{r,Emb}$ elevadas, registando-se mesmo uma tendência de variação positiva do tipo exponencial acontecida entre a amplitude da mistura e a magnitude das descargas do Mondego, como se ilustra na figura 5.3.1. 4.b. Esta descreveu uma tendência de variação significativa que permitiu prever uma amplitude máxima de mistura de água doce da ordem dos 100% e consequentemente um domínio da massa de água fluvial para este sector distal do canal principal na BM, aquando de descargas do Mondego no estuário superiores a 220m^3/s. Para além de ter definido graus de mistura entre a massa de água doce com a marinha tendencialmente mais elevados sob descargas do Mondego de maior magnitude, também se verificou que as maiores amplitudes de mistura coincidiram com as marés vivas e as menores amplitudes de mistura tiveram lugar sob as marés de menor altura, à semelhança do obtido por Bowden (1978). Contudo a amplitude da mistura não descreveu qualquer regressão significativa com a variação da superfície livre.



a) b)

Figura 5.3.1. 4. No diagrama a) ilustra-se a variação da temperatura *vs* salinidade para os diferentes ciclos de maré aferidos na estação da Embocadura. As linhas a cheio de fundo representam as isopícnicas de σ_t expressas em kg/m^3. Na legenda A_w simbolizou a altura da maré em metros e Q_r o caudal médio expresso em m^3/s. Aquando de baixas descargas fluviais do Mondego esta estação foi ocupada fundamentalmente pela massa de água marinha. Sob descargas de maior magnitude a massa de água marinha apenas alcançou este sector distal do estuário praticamente no final da enchente, ficando nas restantes fases sob a influência da massa de água de mistura. No gráfico b) representa-se a tendência de variação registada na Embocadura entre amplitude da mistura ocorrida entre as massas de água fluvial com a marinha, designada em ordenada por "Amplitude de mistura" e expressa sob a forma de percentagem. Em abcissa o caudal médio do rio Mondego expresso em m^3/s. A regressão de potência significativa obtida foi descrita por: $y_{Emb}=0.201*(Q_{r,Emb})^{1.5684}$, com $r^2_{Emb}=0.913$, $r_{Emb}=0.956$, $p<0.05$, $N=6$.

O conhecimento da variação dos graus de mistura ocorridos entre a massa de água doce e a massa de água marinha em função dos principais agentes hidrodinâmicos neste sector do estuário, também permitiu estimar as correspondentes percentagens de água doce constantes na zona de mistura e consequentemente estimar os respectivos tempos de residência, que se determinam no item 5.3.4.6. Permitiram também fazer representações quantitativas da circulação bidimensional no estuário.

O diagrama TS correspondente à estação dos Cinco Irmãos representado na figura 5.3.1. 5, e permitiu determinar que esta estação distante 7.5km da foz, foi dominada por uma forte mistura ocorrida entre a massa de água fluvial e a marinha, enquadrando-a na zona de mistura ZM. Apenas sob marés vivas com $A_{w,5I} \approx 1.8m$ e caudais do Mondego de $Q_{r,5I} \approx 43m^3/s$ registadas em E70392 a massa de água marinha atingiu esta estação na fase terminal da enchente. Neste contexto hidrodinâmico foram alcançados índices de mistura na BM da ordem dos 90%.

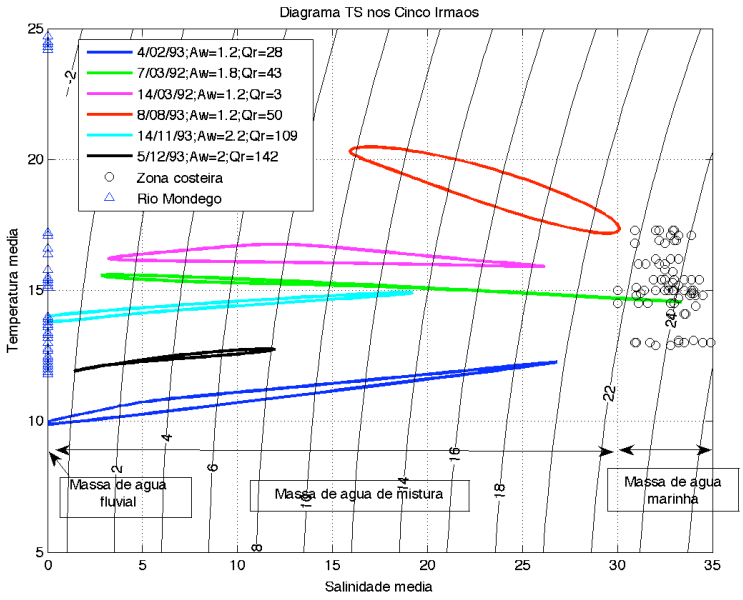


Figura 5.3.1. 5. Diagrama temperatura *vs* salinidade referentes aos ciclos de maré aferidos na estação dos Cinco Irmãos. Massas de água marinha, fluvial e de mistura. As linhas a cheio de fundo representam as isopícnicas de σ_t expressas em kg/m^3. Na legenda A_w simbolizou a altura da maré em metros e Q_r o caudal médio expresso em m^3/s. Esta estação enquadrou-se na zona de mistura do canal principal.

Sob descargas fluviais similares mas debaixo de marés mortas, passou-se a verificar um decréscimo no alcance longitudinal da maré salina para montante no CP, bem como de um ligeiro decréscimo no grau de mistura ocorrido entre a duas massa de água, passando este a ser definido

por exemplo para o ciclo de maré de 5I40293, por uma amplitude da variação compreendida entre os ≈99% de água doce na BM e os 9.7% nas proximidades da PM. Aquando de regimes fluviais mais elevados da ordem dos $Q_{r,5I141193}$≈109m^3/s e dos $Q_{r,5I51293}$≈142m^3/s e sob marés vivas de $A_{w,5i141193}$≈2.2m e de $A_{w,5i51293}$≈2m passou-se a registar um decréscimo relativo significativo da densidade (ou salinidade) dos escoamentos de mistura, definido por amplitudes de variação da percentagem de água doce na massa de água estuarina compreendidas entre os 35% e os 100% e entre os 60% e os 95%, respectivamente para os ciclos de maré 5I141193 e para 5I51293. Estes reflectiram uma maior concentração de água doce neste sector médio do estuário, bem como um menor alcance longitudinal da maré salina no canal principal do estuário, de acordo com Bowden (1978).

A análise do diagrama TS referente à estação da Gala, representado na figura 5.3.1. 6 determinou para as condições hidrodinâmicas amostradas de $Q_{r,Pranto}$≈46m^3/s e de 0.9≤$A_{w,Gala}$≤2.6m que a massa de água marinha nas fases finais da enchente alcançou sempre esta estação distanciada 1.3km da confluência distal com o braço norte. As restantes fases de todos os ciclos de maré foram descritas por uma massa de água de mistura que durante a vazante escoou dos sectores médio-proximal deste braço para o sector distal, e durante a enchente com a entrada da maré foi novamente empurrada para os domínios intermareais localizados a montante da estação da Gala. Dos ciclos de maré estudados, a maré salina terá alcançado sectores mais interiores do braço sul aquando das menores descargas do pranto que tiveram lugar em G60293 com $Q_{r,Gala}$<1m^3/s e sob uma maré viva com $A_{w,Gala}$≈2.2m, uma vez que na estação da Gala foram registadas as densidades relativas mais elevadas na PM. Nesta estação também se verificou que as amplitudes de mistura registadas, tenderam a aumentar directamente quer com a altura da maré, quer com as descargas do Pranto. As duas regressões obtidas embora não significativas, apontaram para tendências de variação que relacionaram o aumento da mistura da água doce com a salgada, quer com o incremento do aporte de água proveniente do rio Pranto para este braço, quer com o aumento da

variação da superfície livre. Esta última, terá sido por sua vez responsável por um incremento no deslocamento longitudinal da massa de água de mistura ao longo deste canal periférico e consequentemente por partes da água menos salobra localizada em sectores mais interiores do braço sul aquando da PM, terem alcançado a estação da Gala nas fases finais da vazante. Foram definidas amplitudes de mistura da ordem dos 24% para G50392, dos 25% para G61291, dos 40% para G201291, dos 52% para G60293, dos 58% para G91203, dos 59% para 60295, dos 70% para G200593 e dos 73% para G121193, conforme figura 5.3.1. 6.

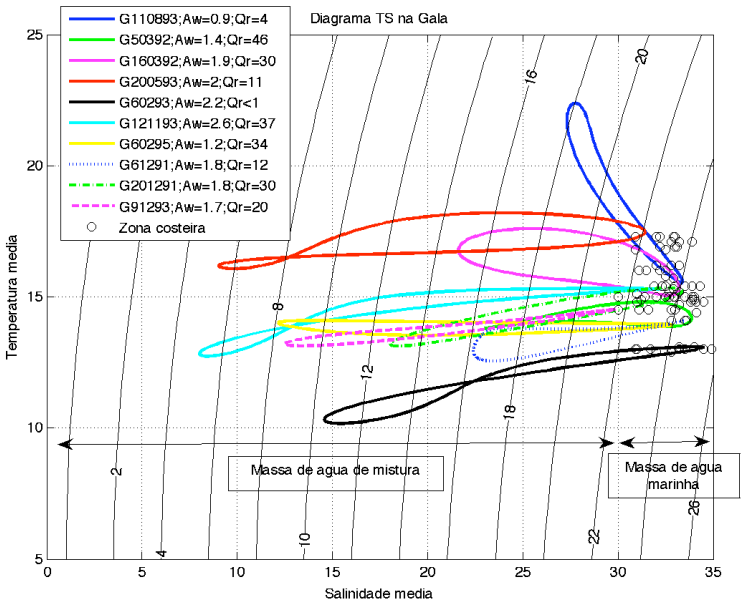


Figura 5.3.1. 6. Diagrama temperatura *vs* salinidade referente aos vários ciclos de maré aferidos na estação da Gala. Massas de água marinha, fluvial e de mistura. As linhas a cheio de fundo representam as isopícnicas de σ_t expressas em kg/m^3. Na legenda A_w simbolizou a altura da maré em metros e Q_r o caudal médio expresso em m^3/s. Esta estação foi alcançada pela massa de água marinha apenas durante a preia-mar, enquadrando-se na zona de mistura do braço sul nas restantes fase da maré.

Apenas no ciclo de maré de G110893 foi detectado um comportamento não conservativo da densidade dos escoamentos, que terá estado associado a um decréscimo relativo de $\sigma_{t,G110893}$ gerado por um aumento relativo da temperatura da água deste braço muito pouco profundo, semelhante ao descrito por Bowden (1978). Este terá sido causado pela irradiação solar que neste período estival terá aquecido o extenso espelho de água, que por sua vez se encontrava sob um hidrodinamismo muito pequeno causado por uma maré de apenas $A_{w,Gala}\approx 0.9$m, de acordo com os gráficos das figuras 5.3.1. 1.b, 5.3.1. 2.a e 5.3.1. 6. Tendo em consideração os resultados obtidos nas duas

estações anteriores e com o facto de as magnitude das descargas do Pranto terem sido inferiores às do Mondego, verificou-se também, que as amplitudes da mistura medidas na Gala apresentaram uma magnitude relativa superior à registada na Embocadura e nos Cinco Irmãos, o que terá estado relacionada com os tempos de residência superiores da massa de água de mistura neste canal periférico do estuário, tal como se comprova no item 5.3.4.6.

Variação Longitudinal da Zona de Mistura

Tendo por objectivo determinar a variação longitudinal dos alcances (R_x) e dos comprimentos (L_x) atingidos pelo domínio marinho (ZC), pela zona de mistura (ZM) e pelo domínio fluvial (ZF) nos diferentes ciclos de maré estudados nos dois principais canais do estuário, recorreu-se à análise da distribuição espacio-temporal da densidade (ou da salinidade) quer nas séries de dados obtidas nas estações da Embocadura (Emb), Gala (Gala), Cinco Irmãos (5I) e Estação Elevatória (EE), quer nas séries daqueles parâmetros auferidas segundo perfis longitudinais ao canal principal (PL_{CP}) e ao longo do braço sul (PL_{BS}), realizados nos finais das fases da enchente e da vazante. Estes dois tipos de séries de dados maregráficos realizaram-se em datas contíguas ou sob condições hidrodinâmicas de alturas de maré e de descargas fluviais análogas. Uma vez que a posição relativa da ZM variou nos dois braços do estuário, ao longo de cada ciclo de maré, alcançando uma distância máxima relativa à foz na PM ($R_{ZM,PM}$) e mínima na BM ($R_{ZM,BM}$), aplicou-se o método descrito em Harleman (1971) *in* Miranda *et al* (2002) quando se pretendeu estimar a distância percorrida pela maré salina entre estas duas fases, tendo apenas por base a análise das séries de dados maregráficos obtidos nas referidas quatro estações. De acordo com o autor citado e com Miranda *et al* (2002), as posições longitudinais relativas de $R_{ZM,x}$ são directamente proporcionais à amplitude da superfície livre e inversamente proporcionais à profundidade média dos canais e às descargas fluviais, mas também condicionadas pela geometria do estuário e pela dissipação da energia sofrida pela acção do atrito de fundo. Os mesmos autores sugerem que as posições extremas da maré salina em cada ciclo de maré, também podem ser estimadas apartir do

conhecimento das posições intermédias do limite superior da maré salina durante as fases da enchente ou vazante, quando estas são registadas numa estação de amostragem localizada na ZM, num determinado momento das duas fases da maré, uma vez que reflectem as complexas interacções locais. Para tal, basta recorrer ao princípio segundo o qual a distância parcial média percorrida pela maré pode ser estimada pelo produto entre a velocidade média da enchente ou da vazante pelo respectivo período parcial que foi dispendido para que fosse alcançada a BM ou a PM. Tanto que, as velocidades e os períodos de enchente determinados apartir dos dados de campo (mesmo que parciais), foram representativos da distorção sofrida pela onda de maré ao propagar-se nos diferentes sectores fisiográficos do estuário do Mondego, bem como, foram representativos das amplitudes das marés e das descargas fluviais amostradas. Assim, no interior de um estuário puderam ser identificados vários domínios dinâmicos segundo Kjerjve (1987) e Fairbridge *in* Brown *et al* (1989), cujos limites variam no espaço e no tempo em diferentes escalas, principalmente em função das intensidades da maré, dos caudais fluviais, do vento e da dinâmica da zona costeira adjacente.

Tendo por base as variações longitudinais da maré salina determinadas para cada ciclo de maré nas quadro estações do estuário, foram calculados os volumes geométricos correspondentes à variação da superfície livre decorrentes entre a BM e a PM, tendo por base o levantamento batimétrico vectorizado do estuário (e descrito no item 5.2). Desta forma determinaram-se os prisma de maré geométricos de acordo com o modelo de segmento adaptado por Dyer & Taylor (1973), que se encontram expressos no quadro 5.3.1. 1.

Análise de Séries de Dados Referentes a Ciclos Completos de Maré

As séries de dados maregráficos referentes à campanha de 7-110893, permitiram estimar as posições relativas das ZC e da ZM formadas no canal principal e no braço sul, considerando as posições relativas dos limites superiores de ZC e de ZM durante a fase de enchente de cada ciclo de maré, em cada estação amostrada. A análise da variação da salinidade (ou da densidade) no ciclo de

maré realizado na estação da Embocadura em E100893, sob uma maré morta de $A_{w,Emb}$=0.9m e descargas médias fluviais de $Q_{r,Emb}$=27m^3/s (figura 5.3.1. 8.a) permitiu apurar que a variação da salinidade junto ao fundo esteve sempre compreendida entre os $32.8 \leq \overline{S}_{b,E100893} \leq 34.1$‰, enquanto a salinidade média integrada na coluna de água no canal variou entre os $29.5 \leq \overline{S}_{E100893} \leq 33.7$‰, e à superfície a salinidade oscilou entre os $22.2 \leq \overline{S}_{s,E100893} \leq 32.6$‰. Estes resultados permitiram enquadrar esta estação na ZC_{CP}, mas também representada pela ZM_{CP} entre as 4.9h e as 7.5h, que correspondeu ao final da vazante e ao princípio da enchente. Considerou-se que o valor mínimo da salinidade (isohalina de $\overline{S}$=30‰), usado para delimitar superiormente o domínio marinho (ZC_{CP}) teve lugar nesta estação durante a enchente pelas 7.50h (hora relativa ao *datum*), ou seja, 0.85h após a estofa da BM_{Emb}. Por sua vez, esta estofa apresentou-se em fase com a salinidade mínima registada nesta estação (coincidiram no tempo). Considerando a velocidade média da enchente ($\overline{u}_{e,E100893} \approx 0.19$m/s) e o tempo decorrido (Δt=0.85h), foi possível estimar a distância média percorrida pelo limite ZC/ZM para jusante desta estação, em 0.6km, pelo que $R_{ZC,BM,CP} \approx 0.7$km. Durante o resto da enchente (12.68-7.5≈5.18h), a ZC_{CP} deverá ter percorrido uma distância longitudinal média da ordem dos 3.5km relativamente à estação da Embocadura, enquadrando o alcance máximo de ZC_{CP} em $R_{ZC,PM,CP} \approx 4.8$km da foz (quadro 5.3.1. 1). A análise da variação das salinidades no perfil longitudinal (figura 5.3.1. 8), corroborada pela determinação do parâmetro de estratificação com $n_{s,E100893} \approx 0.18$, do número de Richardson estuarino integrado ao longo de todo o ciclo de maré com $R_{iE,E100893} \approx 0.57$ e do número de Richardson com $R_{i,E100893} \approx 0.45$ que de acordo com Unesco (1992), Dyer (1997) e Geyer *et al* (2000) definem um regime parcialmente misturado com uma estratificação moderada (tipo II), num estádio muito próximo ao de transição entre o tipo II e o tipo III (Quadro 5.3.1. 1). A análise individual da estratificação nos diferentes perfis verticais, revelou uma baixa estratificação e uma estrutura bem misturada (tipo III) apenas nos perfis muito próximos das PM_{Emb} (e representativos da ZC_{CP}), revelando os restantes perfis uma mistura e

estrutura do tipo II, à semelhança do descrito para o estuário do North Dvina River (USA) por Lupachev (1976 *in* Unesco, 1992). A série de dados obtida na estação dos Cinco Irmãos nesta campanha (5I80893), mostrou que correspondeu a uma maré morta de altura $A_{W,5I}$=1.2m, sob a influência de descargas médias do Mondego da ordem dos $Q_{r,5I}$=50m^3/s. No gráfico b) da figura 5.3.1. 8 ilustra-se a variação da salinidade na coluna de água nesse ciclo de maré, permitindo constatar que junto ao fundo ela oscilou entre os $26.7 \leq \overline{S}_{b,5I80893} \leq 31.6$‰, a salinidade média rondou os $15.1 \leq \overline{S}_{5I80893} \leq 30.5$‰ e à superfície variou entre os $4.1 \leq \overline{S}_{s,5I80893} \leq 27.7$‰. Com estes resultados foi possível verificar que o domínio marinho (com $\overline{S}$=30‰) alcançou esta estação na PM_{5I} ($R_{ZC,PM,CP} \approx 7.5$km), possibilitando estimar a posição relativa da $ZC_{BM,CP}$ na BM_{5I} precedente para os $R_{ZC,BM,CP} \approx 3.9$km, considerando um deslocamento médio de ZC_{CP} da ordem dos $L_{ZC,CP}$=3.6km, considerando ainda a duração da fase de enchente (de 5.20h) e a respectiva velocidade média (de $\overline{u}_{x,e}$=-0.19m/s). Enquadrando-se esta estação na ZM_{CP}, a análise dos parâmetros de estratificação e do número de Richardson determinados para cada perfil vertical que compõe esta série de dados maregráficos, permitiu diferenciar uma estratificação muito pequena e uma mistura muito elevada (com $n_{s,5I80893} \leq 0.1$ e $R_{i,5I80893} < 0.04$) para as fases muito próximas da preia-mar ($\approx PM_{5I} \pm 1.5$h) e muito estratificado do tipo cunha salina próximo na baixa-mar ($\approx BM_{5I} \pm 1.8$h). Nas restantes fases da maré (as mais representativas) apresentou um quadro de mistura e estratificação intermédio, do tipo II, *sensus* Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992). Quando feita a integração destes parâmetros para todo o ciclo de maré, os resultados de $n_{s,5I80893} \approx 0.75$ e de $R_{i,5I80893} \approx 0.22$ determinaram um quadro de estratificação moderada a alta e de mistura parcial, de acordo com Unesco (1992) e condições de turbulência capazes de gerar alguma mistura vertical e uma dinâmica em muito controlada pela maré Darbyshire & West (1992) e Chant & Wilson (2000). Segundo Dyer (1997) este quadro já se enquadra no de tipo I.

Encontrando-se já regularizada a confluência proximal dos dois braços, no sector sul da estação dos Cinco Irmãos não foi registada qualquer frente durante a PM resultante da drenagem de

parte da massa de água de mistura proveniente do sector mais proximal do braço sul, tal como aconteceu por exemplo na campanha de 5I140392 que decorreu sob uma maré similar de $A_{w,5I140392}\approx1.2m$, esquematizada na figura 5.3.1. 10. Com os trabalhos de regularização do braço norte, esta confluência posterior do braço sul com o norte, passou a fazer-se por intermédio de várias manilhas circulares, que reduziram em mais de 60% a área da secção molhada deste sector de interface mais proximal com o canal principal, uma vez que redução da secção para uma maré viva foi de $4.75m^2$ para os $2.9m^2$. Desta forma ter-se-á reduzido em igual magnitude os caudais drenados para o CP e favorecido o aumento dos tempos de residência no braço sul da massa de água de mistura que alcança este sector mais proximal deste braço. Por não ser drenada para o braço norte, esta massa de água passou a ser transportada ao longo do braço sul em direcção à Gala, e a ficar retida durante a baixa-mar nos ambientes submareais do sector médio deste canal. Na fase da maré enchente subsequente, esta massa de mistura passou a ser novamente empurrada para montante para o sector mais proximal do braço sul. Contudo, durante parte da fase da vazante, entre as 10.10h e as 11.50h[3] foi registada uma frente que apresentou uma disposição longitudinal ao canal principal, enquadrando-se sensivelmente entre os pontos de amostragem 5I(S) e o 5I(M) de acordo com o esquema da figura 5.3.1. 7, e diferenciou duas massas de água de mistura distintas. A caracterização física destas massas de água teve por base a análise dos perfis verticais 5I85, 5I86 e 5I87 realizados nos três pontos de amostragem da estação dos Cinco Irmãos. A massa de água que circulou junto à margem esquerda e que circunscreveu o ponto de amostragem 5I(S) ocupou apenas o primeiro metro junto à superfície. Comparativamente à massa que abrangeu a restante parte do canal, apresentou menores densidades e salinidades com $\sigma t_{5I(S),s}\approx11.5kg/m^3$ e $S_{5I(S),s}\approx18‰$ contra os $\sigma t_{5I(M),s}\approx15.2kg/m^3$, $\sigma t_{5I(N),s}\approx18.7kg/m^3$ e os $S_{5I(M),s}\approx22.6‰$, $S_{5I(N),s}\approx26.7‰$. Apresentou temperaturas mais baixas da ordem dos $T_{5I(S),s}\approx21.5ºC$ para os $T_{5I(M),s}\approx20.4ºC$ e $T_{5I(N),s}\approx19ºC$, e valores de turbidez semelhantes, da ordem dos 8NTU. Muito embora ambas as massas de água tivessem apresentado

[3]. Tempo relativo ao *datum* da análise harmónica.

movimentos de vazante, a que se movimentou junto à margem esquerda também apresentou nesta fase velocidades com magnitudes inferiores e contrastantes com as registadas nos perfis 5I(M) e 5I(N).

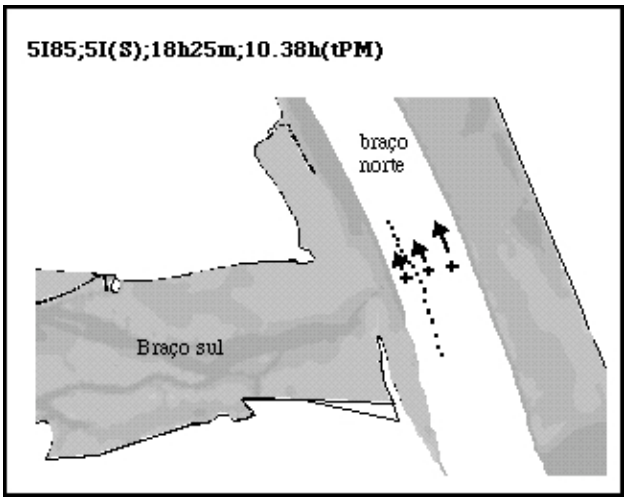


Figura 5.3.1. 7. Frente que se formou na estação dos Cinco Irmãos durante a fase da vazante, na série 5I80893. Diferenciou dois tipos de massa de água de mistura com densidades ligeiramente diferentes. A massa de água que circulou junto à margem esquerda, de menor densidade que apresentou apenas uma espessura da ordem dos 1.2m.

A série de dados EE70893 obtida nesta campanha de campo na estação Elevatória, permitiu definir o alcance máximo da $ZM_{PM,CP}$≈15km da foz, por nela se terem registado salinidades de fundo de $S_{b,PM,EE}$=0.3‰ na preia-mar e desta forma ter definido o alcance máximo da maré salina. Considerando a velocidade média da enchente nesta estação de ($\overline{u}_e$ ≈-0.24m/s) e a duração de $T_{e,EE}$≈4.98h, estimou-se o deslocamento médio da ZM_{CP} neste ciclo de maré em 4.3km, posicionando a $R_{ZM,BM,CP}$≈11.2km (quadro 5.3.1. 1), de acordo com Chant & Wilson (2000). Para o braço sul, recorreu-se à análise da variação da salinidade ocorrida na coluna de água durante o ciclo de maré G110893, representada no gráfico c) da figura 5.3.1. 8, permitindo constatar que este parâmetro variou entre os $27.4 \leq \overline{S}_{b,G110893} \leq 33.5$‰ junto ao fundo, entre os $27.1 \leq \overline{S}_{G110893} \leq 33.4$‰ na coluna de água, e variou entre os $26.4 \leq \overline{S}_{s,G110893} \leq 33.3$‰ à superfície dos escoamentos. Permitiu igualmente verificar que entre as 3h e as 10.5h esta estação esteve abrangida pela ZM_{BS} (com $\overline{S}_{s,G110893}$ <30‰), enquanto nas restantes fases da maré, pelo domínio marinho ZC_{BS}. Durante todo o ciclo de maré apresentou um regime bem misturado, tipo III, *sensus* Pritchard (1989) *in* Miranda *et*

al (2002) com $n_{s,G110893}$≈0.02 desprovido de estratificação vertical de densidade (Unesco, 1992), e por números de Richardson médios de todos os perfis analisados de $R_{i,G110893}$≈0.21 e de $R_{iE,G110893}$≈0.78, que reflectiram de acordo com Dyer (1989) e Darbyshire & West (1992), um domínio dos processos de turbulência face à estratificação de densidade por parte da maré. A ocorrência durante a enchente da isohalina $\overline{S}_{e,G110893}$ ≈30‰ às 10.5h, afastada 3.81h da estofa da BM_{Gala} e 2.11h antes da estofa da PM_{Gala}, permitiu estimar o deslocamento médio do limite superior da ZC_{BS} para jusante e para montante desta estação, respectivamente em 10.5h*0.10m/s=1.4km e em 3.81h*0.10m/s=0.8km, considerando para esta fase da maré um período de $T_{e,G110893}$≈4.98h e uma a velocidade média de $\overline{u}_{e,G110893}$ ≈-0.10m/s.

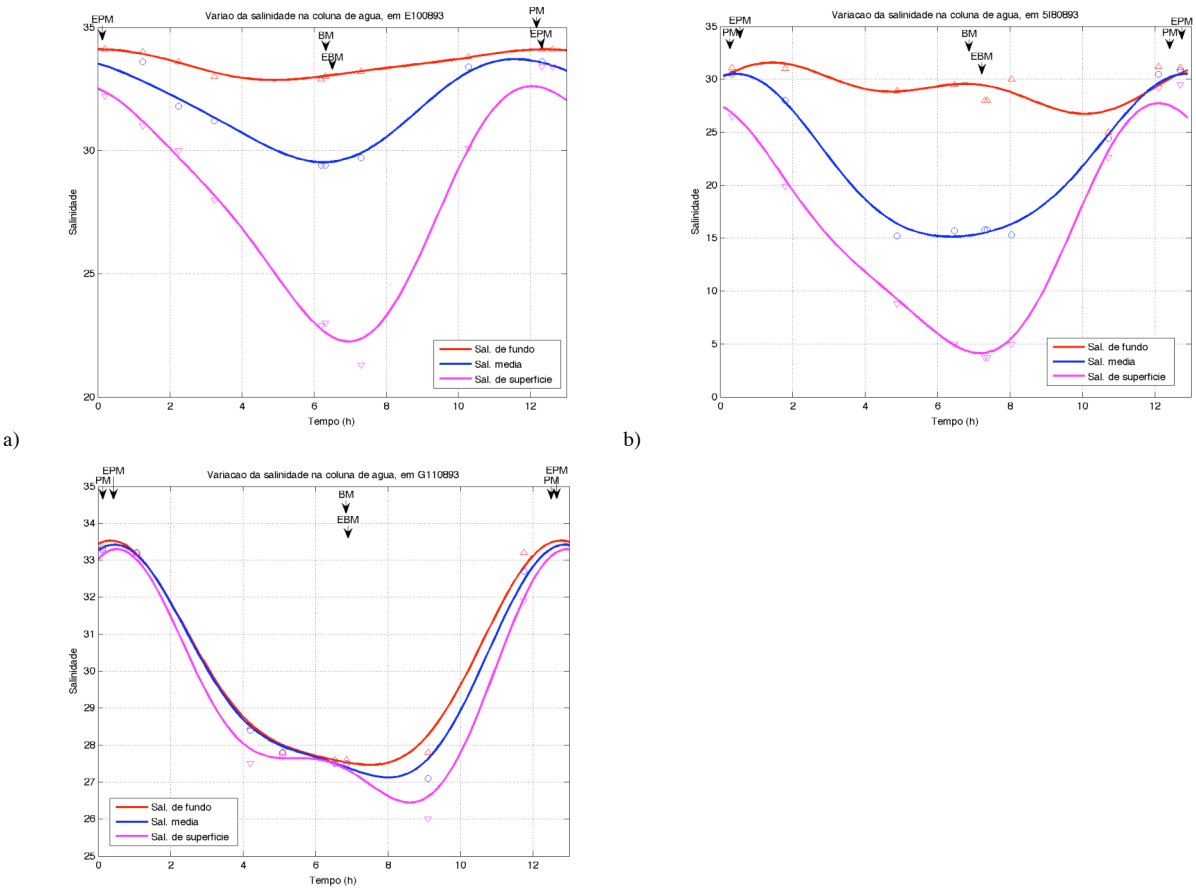


Figura 5.3.1. 8. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E100893, b) Cinco Irmãos com 5I80893, c) na Gala com G110893, referentes à campanha de campo 7-110893, no perfil central do canal, G(M). As designações PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Descreveram regimes parcialmente misturados para o canal principal e bem misturado para o braço sul.

Permitiu igualmente posicionar o limite superior do domínio ZC_{BS}, na BM_{Gala}, à entrada do braço sul na confluência com o braço norte aos $R_{ZC,BM,BS}\approx1.6$km e localizar o limite superior atingido na PM_{Gala} aos $R_{ZC,PM,BS}\approx3.8$km, definindo um deslocamento longitudinal médio da ordem dos 2.1km (quadro 5.3.1. 1).

A campanha de 14-16/03/92 permitiu enquadrar a variação do domínio marinho entre $0\leq ZC_{x,CP}\leq3.4$km, o de mistura entre os $4.7\leq ZM_{x,CP}\leq9.2$km e o fluvial a montante deste (quadro 5.3.1. 1). Estes resultados fundamentaram-se em parte na análise do gráfico a) da figura 5.3.1. 11, respeitante à estação da Embocadura e para o ciclo de maré E150392, que descreve variações da salinidade compreendidas entre os $21.5\leq \overline{S}_{b,E150392} \leq32.9‰$ para os escoamentos de fundo, compreendidas entre os $27.9\leq \overline{S}_{E150392} \leq32.7‰$ para os escoamentos médios e entre os $17.2\leq \overline{S}_{s,E150392} \leq31.9‰$ nos escoamentos de superfície. Estes também realçam o posicionamento desta estação fundamentalmente na ZC, muito embora nas fases próximas da BM ($BM_{Emb}\pm\approx2$h) a ZM_{CP} também a tenha abrangido. Aquando da BM_{CP}, a ZM_{CP} terá mesmo ocupado todo o sector distal do canal principal do estuário uma vez que o limite superior da ZC alcançou esta estação 2.33h após a estofa da BM_{Emb}, e desta forma indiciou, durante este período de tempo ter percorrido uma distância média da ordem dos 2.2km que foi muito superior à distância desta estação à foz. No restante período da enchente (3.59h), a ZM_{CP} terá percorrido uma distância média da ordem dos 3.4km considerando a velocidade média desta fase de $\overline{u}_{e,E150392}$=-0.26m/s, posicionando $R_{ZC,PM,CP,Emb}\approx5.5$km (quadro 5.3.1. 1). Definiu igualmente regimes de mistura e estratificação do tipo parcialmente misturados para as fases próximas das baixa-mares ($\approx BM_{Emb}\pm3$h), encontrando-se as restantes fases representadas com regimes bem misturados, *sensus* Geyer *et al* (2000). A integração do parâmetro de estratificação e do número de Richardson para todo o ciclo de maré de $A_{w,Emb}$=1.3m e $Q_{r,Emb}$=37m^3/s descreveu uma estratificação moderada e parcialmente misturado, do tipo II com $n_{s,E150392}\leq0.23$, $R_{i,E150392}\approx0.20$ e com $R_{iE,E150392}\approx0.70$ segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992).

A fase inicial da enchente caracterizou-se pela formação de frentes de superfície resultantes da confluência de massas distintas que se propagaram em sentidos contrários (esquema a) da figura 5.3.1. 9). Uma gerou-se no sector norte da estação da Embocadura, entre a massa de água marinha que se movimentava em sentido da enchente e começou a empurrar para montante uma massa de água de mistura, de superfície, proveniente do canal principal que se deslocava preferencialmente pela margem direita deste canal em sentido da vazante, de acordo com o esquema a) da figura 5.3.1. 9. Esta massa de água superficial apresentava uma espessura da ordem dos 1.5m a 3m de espessura. Nos perfis E(M) e E(S) a maré já se apresentava de enchente em toda a coluna de água. Formou-se uma outra frente nesta fase da maré, compreendida entre os escoamentos ainda em final de vazante da massa de água de mistura proveniente do braço sul e a massa de água marinha que entrava pelo canal principal, de acordo com o esquema a) da figura 5.3.1. 9. Com o evoluir da enchente (esquema b) da figura 5.3.1. 9) a frente no sector distal do braço sul dissipou-se, passando a maré a entrar por este canal em toda a coluna de água. A frente formada no canal principal no sector norte deste canal permaneceu praticamente no mesmo lugar durante quase toda a fase de enchente, resultando aquela da não mistura à superfície entre a massa de água marinha que se deslocava para o interior do estuário com a massa de água de superfície proveniente do Mondego, confinada ao sector norte do canal e que se deslocava em sentido de vazante (figura 5.3.1. 9.c). Na fase final da enchente (figura 5.3.1. 9.d) com o decréscimo da energia da maré, a frente gerada no sector norte deste canal passou a abranger parte do sector central. Uma outra frente formou-se no sector sul da estação da Embocadura, resultante da não mistura ocorrida entre a massa de água marinha que se deslocava braço norte acima, com a massa de água de mistura que começou a escoar em direcção à foz proveniente do braço sul e que começou a interceptar obliquamente a direcção de propagação da primeira, como se representa no esquema e) da figura 5.3.1. 9. A fase final da enchente as duas frentes acabaram por se juntar numa única com uma forma em "\" que foi migrando em direcção à foz do estuário, representada na frente do esquema f) da figura 5.3.1. 9. O movimento preferencial

da massa de água de mistura, menos densa, junto à margem direita do canal da embocadura resultou da morfologia curvilínea do braço norte que canalizou estes escoamentos de vazante para aquele sector do estuário, enquanto a baixa salinidade destes escoamentos superficiais terá estado fundamentalmente relacionada como os processos de arrastamento gerados na interface entre a fina camada superficial de água do Mondego em movimento de vazante sobre a massa de água de mistura em movimento de final de enchente, processo este que se estendeu ao longo de todo o braço norte.

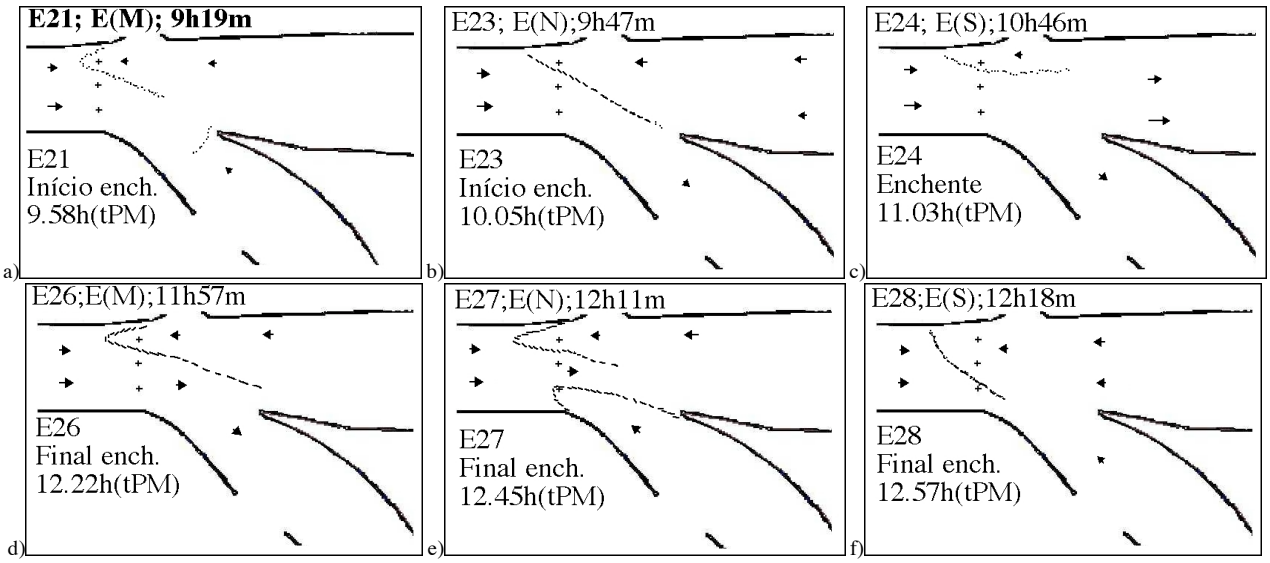


Figura 5.3.1. 9. Frentes que se formaram durante a fase de enchente na estação da Embocadura, na série E150392. Os esquemas a), b), c) referem-se ao princípio desta fase, e foram elaborados aquando da leitura dos perfis E21, E23 e E24 efectuados às 9h19m, 9h47m e às 10h46m, hora local. A frente formada junto ao sector norte do canal principal nesta fase resultou da não mistura entre a massa de água marinha com um fina camada de água de mistura com origem nos caudais do Mondego que circulava preferencialmente junto à margem direita em sentido de vazante. Os esquemas d), e), f) referem-se à fase terminal da enchente e foram elaborados aquando da leitura dos perfis verticais E26, E27 e E28, pelas 11h57m, 12h11m e as 12h18m, hora local, ou pelas 12.22h, 12.45h e 12.57h, hora relativa à PM de referência à análise harmónica. Nesta fase formam-se duas frentes, resultantes da confluência quer da massa de água de mistura com origem no Mondego, quer da massa de água de mistura proveniente do braço sul (ambas com sentidos de propagação de vazante) com a massa de água marinha em fase terminal da enchente.

A análise da variação da salinidade referente ao ciclo de maré de 5I140392 obtido nos Cinco Irmãos, permitiu enquadrar esta estação na zona de mistura, uma vez que apresentou variações de salinidade de $5.3 \leq \overline{S}_{b,5I140392} \leq 27.9‰$, de $4.6 \leq \overline{S}_{5I140392} \leq 26.1‰$ e de $3.4 \leq \overline{S}_{s,5I140392} \leq 24.7‰$, como se ilustra no gráfico b) da figura 5.3.1. 11. De acordo com Unesco (1992) e Miranda *et al* (2002), ao considerar um comportamento do tipo linear (conservativo) da variação da salinidade média na

zona de mistura, a isohalina de $\overline{S}$=0‰ teria ocorrido nesta estação por volta das 10h se a fase da vazante tivesse sido prolongada nesta estação. Considerando a ocorrência da salinidade mínima às 7.9h assumindo um comportamento de variação linear, este período de tempo decorrido entre as 7.9h e as10h, terá representado uma distância média percorrida pela maré salina da ordem dos 1.8km, ponderando a velocidade média da vazante de $\overline{u}_{e,5I140392}$ =0.24m/s, o que permitiu posicionar $R_{BM,ZM,CP}$≈9.3km. O deslocamento médio terá sido da ordem dos $L_{ZM,BM\text{-}PM,CP}$≈4.6km, posicionando $R_{ZC,PM,CP,5I}$≈13.9km (quadro 5.3.1. 1). Os diferentes perfis verticais realizados durante a vazante descreveram quadros parcialmente misturados enquanto os realizados durante a enchente definiram bem misturados, em concordância com o estabelecido por Geyer *et al* (2000). A integração do parâmetro de estratificação e dos números de Richardson para todo o ciclo de maré ao terem sido da ordem dos $n_{s,5I140392}$≈0.25, dos $R_{i,5I140392}$≈0.22 e dos $R_{iE,5I140392}$≈0.11, foram representativos de uma estratificação moderada a baixa e um regime parcialmente misturado, do tipo II segundo Darbyshire & West (1992) e Unesco (1992) para todo o ciclo de maré, bem como, de condições de turbulência que se sobrepuseram à estratificação da densidade e consequentemente de um regime dinâmico forçado pela maré (Quadro 5.3.1. 1). Contudo, verificou-se que durante a fase da enchente foi caracterizada por um quadro do tipo III, muito bem misturado, enquanto durante a vazante por uma estratificação moderada do tipo II, como se exemplifica no gráfico b) da figura 5.3.1. 11. Comportamento similar foi registado nos ciclos de maré aferidos nesta estação sob baixas descargas do Mondego, nomeadamente no 5I70392 e no 5I40293 (figuras e 5.3.1. 13.b e 5.3.1. 19.b). O registo de uma estratificação muito reduzida da salinidade na coluna de água durante a fase da enchente, neste sector distante 7.5km da foz do estuário, apontou para uma grande capacidade de entrada da maré, que por sua vez foi responsável por uma forte mistura.

Esta série de dados 5I140392 também foi caracterizada pela ocorrência de duas frentes. Uma que se gerou no sector sul [5I(S)] da estação dos Cinco Irmãos, que se posicionou junto à margem esquerda mesmo em frente à confluência proximal com o braço sul, e uma outra frente de maior

dimensão, em forma de "<", que se deslocou longitudinalmente ao longo do canal principal, encontrando-se ambas as frentes esquematizadas na figura 5.3.1. 10. A primeira resultou de parte da massa de água de mistura localizada no sector mais proximal do braço sul ter drenado para o CP durante as fases final da enchente e inicial da vazante, enquanto aquele sector do estuário permaneceu submerso[4]. Este movimento longitudinal resultou do gradiente barotrópico gerado entre os dois canais neste sector do estuário, que foi segundo o sentido do braço norte. Drenou uma massa de água de mistura que comparativamente à que circulava para montante ao longo do CP, apresentava-se menos salina, mais quente, mais túrbida e menos densa, tendo por base os resultados obtidos no perfil 5I47, medidos no sector sul 5I(S), com $S_{CP,PM}$=28‰, $S_{BS,PM}$=23‰; $T_{CP,PM}$=15.9‰, $T_{BS,PM}$=17‰; $Turb_{CP,PM}$≈5NTU, $Turb_{BS,PM}$≈10NTU e com $\sigma t_{CP,PM}$≈20.4 kg/m^3 e $\sigma t_{BS,PM}$≈15.2 kg/m^3. Encontrando-se na fase terminal da enchente, estes resultados corroboraram a maior propagação da maré salina pelo CP. Esta frente durante o final da enchente foi arrastada para montante junto à margem esquerda, mas como decréscimo da magnitude das correntes perto da estofa da PM, a frente passou também a abranger o ponto de amostragem central, 5I(M), como se representa nos esquemas a) e b) da figura 5.3.1. 10. Com a mudança da maré nos Cinco Irmãos, esta frente passou a ser arrastada para jusante desta estação junto à margem esquerda do CP, conforme esquema d) da figura 5.3.1. 10, apresentando uma espessura que rondou os 0.5m a um metro. A temperatura mais elevada desta massa de água relacionou-se quer com a insolação directa sofrida pelo amplo espelho de água muito pouco profundo e com baixo hidrodinamismo dos sectores médio-proximal do braço sul, quer com o aquecimento sofrido aquando da inundação dos ambientes intermareais constituídos por sedimentos lutíticos, de cor escura, muito ricos em matéria orgânica. A frente que se formou no canal principal esteve relacionada com a confluência de duas massas de água distintas, bem como com a definição à superfície da transição da fase da enchente para a da vazante. No esquema c) da figura 5.3.1. 10 representa-se na estação dos Cinco Irmãos, a massa de água marinha praticamente

[4]. Correspondeu às fases da variação da superfície livre acima da cota ≈+2.4mZH, esquematizadas nas figuras 5.2.3 e 5.2.4.

na estofa da preia-mar, que por sua vez estava a ser empurrada pela massa de água de mistura em movimento de vazante, que se localizava a montante da frente. No esquema seguinte, esta frente de superfície já progrediu uns 100m para jusante, encontrando-se a estação dos Cincos Irmãos numa fase inicial da vazante. Esta forma de "<" foi registada ao longo de todo o sector proximal do braço norte, sempre em direcção à foz e relacionou-se com a competição ocorrida entre as correntes de maré e as correntes barotrópicas de origem fluvial. Nesta estação, a estofa da PM teve lugar por volta das 13.05h (hora relativa ao *datum* da análise harmónica), mas foi caracterizada por um atraso que aumentou em direcção ao fundo, tendo sido da ordem das 0.18h na coluna de água.

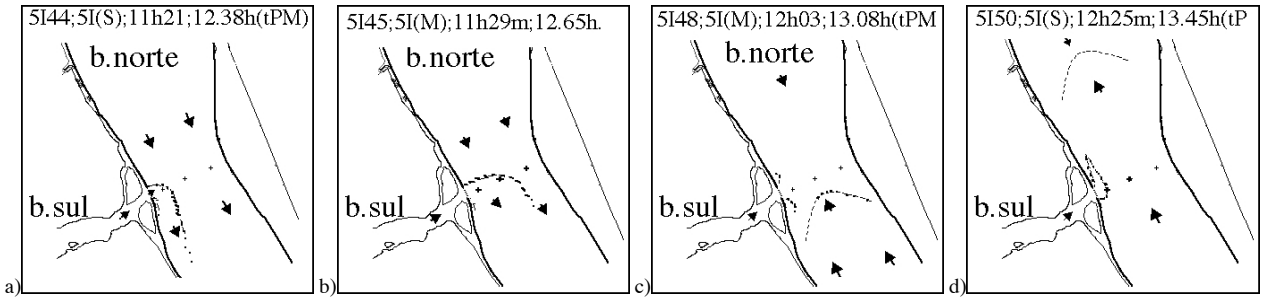


Figura 5.3.1. 10. Frentes registadas na estação dos Cinco Irmãos durante o ciclo de maré 5I140392. Os esquemas a), b) e c) representaram a fase final da enchente na estação dos Cinco Irmãos, enquanto o d) a fase inicial da vazante. Os perfis 5I44 e 5I48 foram obtidos no ponto de amostragem sul [5I(S)] às 11h21m e às 12h03m, hora local, ou às 12.38h e às 13.08h relativamente ao *datum* da análise harmónica. O perfil d) foi lido no ponto de amostragem sul, às 11h25m, ou às 13.45h relativamente ao *datum* da análise harmónica. A frente que se propagou ao longo do canal principal em direcção à foz apresentou uma forma em "<" e resultou da confluência entre as massas de água marinha e de mistura que se propagavam com sentidos opostos, a primeira segundo a enchente e a segunda segundo a vazante.

A estação Elevatória enquadrou-se sempre no domínio fluvial ZF_{CP}, tendo apresentado apenas água doce sujeita à maré dinâmica. Na estação do braço sul, a variação da salinidade na coluna de água representada no gráfico c) da figura 5.3.1. 11, referente ao ciclo de maré de G160392, definiu oscilações deste parâmetro compreendidas entre os $20.8 \leq \overline{S}_{b,G160392} \leq 33.2‰$ junto ao fundo, compreendidas entre os $20.6 \leq \overline{S}_{G160392} \leq 32.7‰$ na coluna de água e entre os $20.4 \leq \overline{S}_{s,G160392} \leq 32.6‰$ à superfície dos escoamentos. Estas, permitiram enquadrar a Gala no domínio marinho ZC_{BS} apenas durante as fases próximas da preia-mar, entre as 10.20h e as 15.50h, ficando as restantes fases da maré representadas pela ZM_{BS}. O registo da passagem do limite superior da ZC_{BS} por esta estação aconteceu às 10.20h, possibilitando assim determinar o

deslocamento sofrido por este domínio nas 3.92 primeiras horas da enchente (ao longo do troço situado a jusante desta estação) em 2.8km (com 3.92h*0.23m/s=2.8km), bem como, estimar o deslocamento sofrido para montante desta estação em 1.9km nas 2.29h subsequentes da enchente. Desta forma, considerando a posição relativa desta estação, a 3km da foz e a 1.4km da confluência distal dos braços norte e sul, verificou-se que na BM, a ZC ter-se-á posicionado muito próximo dos molhes da embocadura (a ≈0.2km), fora deste braço periférico, enquanto na preia-mar o domínio ZC_{BS} terá abrangido mais de metade do desenvolvimento longitudinal do braço sul, alcançando os $R_{ZC,PM,BS}$≈4.9km (quadro 5.3.1. 1).

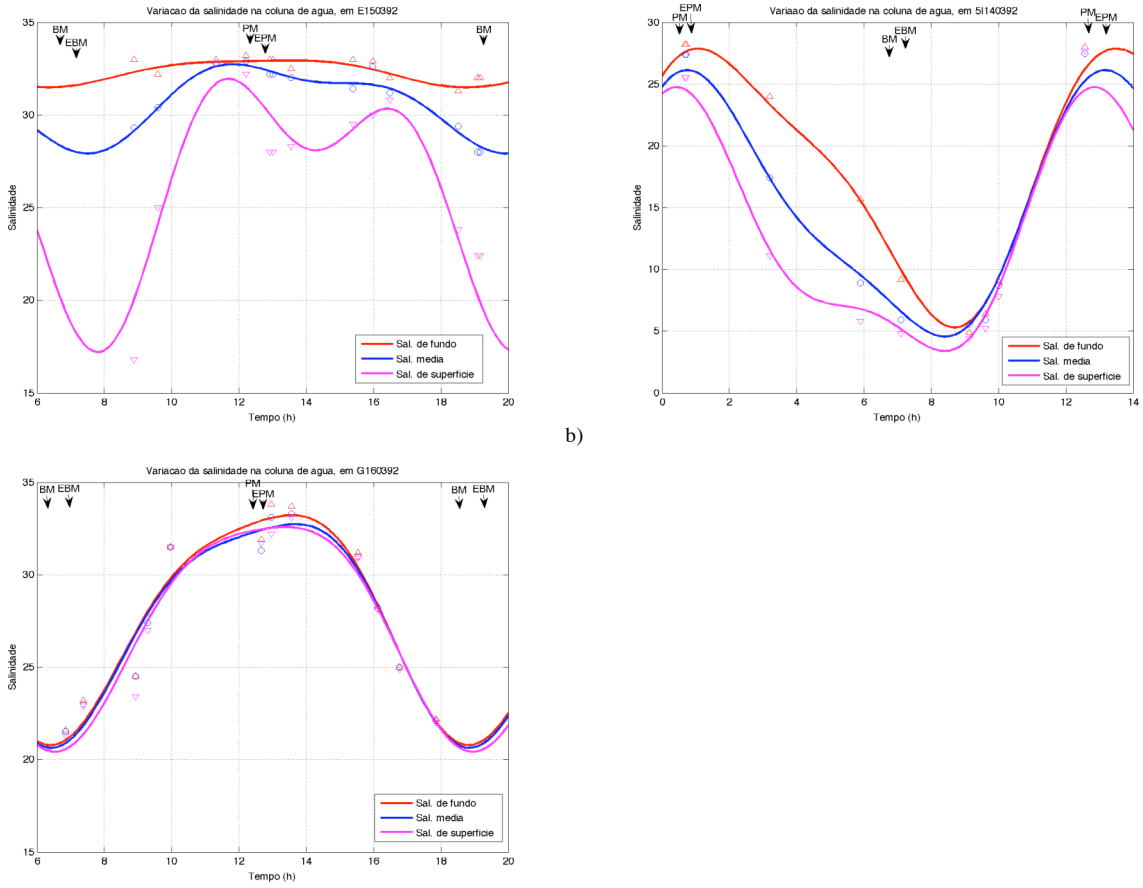


Figura 5.3.1. 11. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E150392, b) Cinco Irmãos com a referência 5I140392, c) na Gala com G160392, referentes à campanha de campo 14-160392, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Descreveram quadros parcialmente misturados para o canal principal e bem misturado para o braço sul.

Foi caracterizado por uma mistura vertical muito elevada e por uma estratificação muito reduzida do tipo III (bem misturado), com $n_{s,G160392}$≈0.02, distinta do canal principal (figura 5.3.1.

11), bem como, por condições de turbulência elevadas geradoras de uma grande mistura vertical e de um regime dinâmico forçado pela maré com $R_{i,G160392}\approx0.18$ e $R_{iE,G160392}\approx0.48$ *sensus* Dyer (1989), Unesco (1992) e Darbyshire & West (1992).

Na campanha de 5-8/03/92 foi possível verificar que a estação da Embocadura enquadrou-se fundamentalmente na ZC, enquanto a dos Cinco Irmãos na ZM. A variação da salinidade na estação da Embocadura referente ao ciclo de maré E80392 registado sob uma maré de $A_{w,Emb}\approx1.5$m e descargas médias do Mondego de $Q_{r,Emb}=26m^3/s$, constante no gráfico a) da figura 5.3.1. 13 realçou variações de salinidade junto ao fundo compreendidas entre os $31.8\leq\overline{S}_{b,E80392}\leq34‰$, na coluna de água entre os $28.6\leq\overline{S}_{E80392}\leq33.9‰$ e à superfície entre os $20.5\leq\overline{S}_{s,E80392}\leq33.2‰$. Estes resultados mostraram que o domínio marinho representou praticamente todo o ciclo de maré com excepção das fases próximas da baixa-mar (≈BM±1h) que esta estação foi abrangida pela ZM. Considerando que os deslocamentos sofridos pelo ZC durante as fases de enchente, foram directamente proporcionais às velocidades médias e às respectivas durações, de acordo com Harleman (1971) *in* Miranda *et al* (2002) e Thatcher & Harleman (1972) tornou-se possível, com base na ocorrência do limite superior da ZC_{CP} na estação da Embocadura por volta das 7.9h (com $\overline{S}_{E80392}=30‰$), estimar quer a distância média percorrida pelo limite superior da ZC_{CP} de jusante até esta estação, quer a distância média percorrida por parte da ZC_{CP} para montante. O primeiro deslocamento foi estimado em 1.24h*0.27m/s=1.2km, enquanto o segundo em 4.03h*0.27m/s=4.2km, pelo que permitiram determinar as posições relativas de $R_{ZC,BM,CP}\approx0.1$km e de $R_{ZC,PM,CP}\approx5.5$km (quadro 5.3.1. 1). Este ciclo de maré também foi descrito por regimes parcialmente misturados com uma estratificação moderada próximo da baixa-mar ($\approx BM_{Emb}\pm2$h) e por regimes bem misturados nas restantes fases, de acordo com Geyer *et al* (2000). Quando integrados o parâmetro de estratificação e o número de Richardson para todo o ciclo de maré verificou-se que este quadro hidrodinâmico foi representativo de uma estratificação moderada e de um regime parcialmente misturado, do tipo II segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992), muito próximo do bem misturado, com

$n_{s,E80392}$≈0.16, $R_{i,E80392}$≈0.2 e com $R_{iE,E80392}$≈0.45, descrevendo segundo Darbyshire & West (1992) condições de turbulência que se sobrepõem à estratificação de densidade, gerando mistura vertical.

O início da fase da enchente na estação da Embocadura foi caracterizada pelo registo de uma frente em forma de ">" que se foi deslocando ao longo do troço proximal do canal da embocadura até alcançar esta estação (figura 5.3.1. 12.a). Manteve esta forma de ">" até alcançar o sector distal do braço norte, local apartir do qual passou a apresentar uma forma em "\", e a traduzir um domínio das correntes da maré enchente pelo sector sul, contrabalançadas pelo domínio das descargas do Mondego pelo sector norte e central deste canal (figura 5.3.1. 12.c). Antes da bifurcação em dois braços, a forma desta frente em ">" reflectiu também a contribuição da massa de água de mistura proveniente do braço sul que circulou preferencialmente pelo sector sul do canal principal neste sector da embocadura.

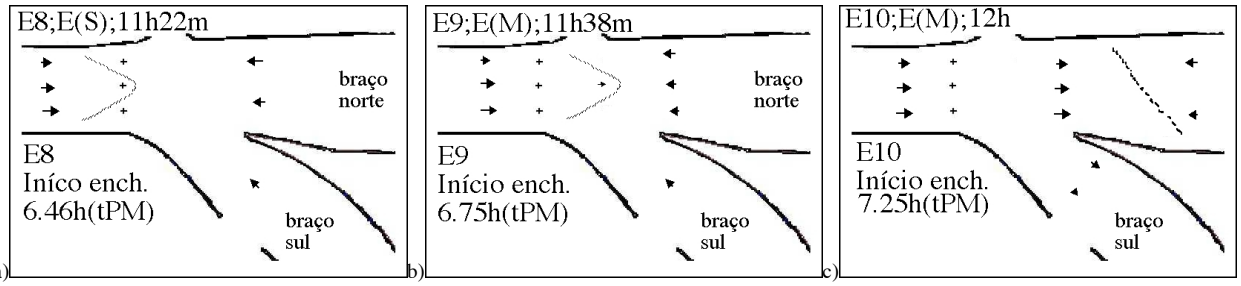


Figura 5.3.1. 12. Frente que se formou durante a transição da fase final da vazante com o início da enchente no sector distal do estuário. Reflectiu à superfície, a transição do domínio marinho ZC com a zona de mistura, ZM, no canal principal. A forma em "\" que se registou no sector distal do braço norte, relacionou-se fundamentalmente com a confluência duas massas de água que se propagaram com sentidos opostos. A maré propagou-se com maior intensidade pelo sector sul do canal principal (CP) enquanto a massa de água de mistura proveniente do braço norte, propagou-se com maior intensidade pelos sectores norte e central do CP. A forma em ">" que se registou antes do braço norte, relacionou-se também com o facto de a massa de água de vazante proveniente do braço sul se ter propagado preferencialmente pelo sector sul do CP.

Cerca de 30 minutos antes de esta frente em forma de ">" ter alcançado a estação da embocadura no perfil central E(M), junto ao fundo, no ponto de amostragem E(S) começaram a registar-se velocidades de corrente negativas e consequentemente indiciadoras do início da fase de enchente neste local. Esta frente traduziu a não mistura que aconteceu ao longo do sector distal do canal principal do estuário entre a massa de água marinha, com as massas de água de mistura menos densas, de vazante, provenientes quer do braço norte, quer do braço sul (esquemas a) e b) da figura 5.3.1. 12). Estas propagaram-se preferencialmente respectivamente pelos sectores médio-norte e

pelo sector sul do canal principal. Esta frente deslocou-se para montante, ao longo do canal principal até parte do sector distal do braço norte, dissipando-se em frente ao cais comercial.

O ciclo de maré obtido nos Cinco Irmãos, com a designação de 5I70392, decorreu sob uma maré viva de $A_{w,Emb}$=1.8m e descargas médias do Mondego de $Q_{r,Emb}$=43m^3/s. O estudo do comportamento da variação da salinidade na coluna de água e ao longo do tempo nesta estação, encontra-se representado no gráfico b) da figura 5.3.1. 13 e permitiu identificar uma variação da salinidade junto ao fundo compreendida entre os $4 \leq \overline{S}_{b,5I70392} \leq 33.7$‰, compreendida entre os $2.2 \leq \overline{S}_{5I70392} \leq 33.6$‰ para os escoamentos médios e compreendida entre os $1 \leq \overline{S}_{s,5I70392} \leq 32.1$‰ junto à superfície. Estes resultados enquadraram esta estação na ZC durante a preia-mar ($\approx PM_{5I} \pm 1$h) e na ZM_{CP} nas restantes fases da maré. Para definir a variação longitudinal da zona de mistura no canal principal, recorreu-se ao método definido em Miranda *et al* (2002) que pressupõe um comportamento linear na variação da salinidade média na zona de mistura (de acordo com o gráfico b) da figura 5.3.1. 13) e possibilitou, neste caso, estimar a distância que $R_{ZM,BM,CP}$ estaria relativamente à estação dos Cinco Irmãos. Para tal, considerou-se que aquela teria sido da mesma ordem de grandeza do deslocamento médio sofrido pela onda de maré se a vazante nesta estação prosseguisse por mais 0.27h, com uma velocidade média da ordem dos $\overline{u}_{v,5I70392}$=0.36m/s. A este intervalo de tempo compreendido entre a estofa da BM_{5I}[5] e a ocorrência da isohalina de $\overline{S}$=0‰, compreendido entre as 8.13h e as 8.4h (gráfico b) da figura 5.3.1. 13), descreveu uma distância média percorrida pela maré salina da ordem dos 0.3km, posicionando $R_{ZM,BM,CP}$=7.8km (quadro 5.3.1. 1). Para estimar a posição relativa alcançada pela zona de mistura na PM, considerou-se a distância média percorrida pela maré durante as 5.02h da enchente, a uma velocidade média de $\overline{u}_{e,5I70392}$=-0.29m/s, que foi da ordem dos 5.2km, posicionando $R_{ZC,PM,CP}$ nos 13.1km. Durante a fase da enchente, este ciclo de maré ostentou uma estratificação da salinidade muito pequena do tipo bem misturado (tipo III segundo Pritchard, 1989 *in* Miranda *et al*, 2002 e Unesco, 1992), enquanto

[5]. ou da ocorrência da salinidade de menor magnitude.

durante a vazante uma estrutura parcialmente misturada do tipo II, *sensus* Geyer *et al* (2000). A integração do parâmetro de estratificação e do número de Richardson para todo o ciclo de maré e este quadro hidrodinâmico, determinou uma estratificação moderada e um regime parcialmente misturado, do tipo II, com $n_{s,5I70392}\approx0.39$ (Unesco, 1992), e com $R_{i,5I70392}\approx0.64$ e $R_{iE,5I70392}\approx0.75$ que segundo Dyer (1989) definiu condições de turbulência que se sobrepuseram à estratificação de densidade, gerando mistura vertical e também com uma dinâmica do canal principal dominada pela maré.

Na fase de maior altura da coluna de água da série 5I70392, nesta estação do estuário também foi registada durante as actividades de campo uma frente junto ao sector sul, 5I(S) que resultou do escoamento da massa de água proveniente do sector mais proximal do braço sul, à semelhança das representações da figura 5.3.1. 18.

A estação Elevatória enquadrou-se no domínio fluvial, por ter sofrido apenas a acção da maré dinâmica. A análise da variação da salinidade ocorrida durante o ciclo de maré aferido na estação da Gala em G50392, representada no gráfico c) da figura 5.3.1. 13, determinou variações de salinidade compreendidas entre os $22.7\leq\overline{S}_{b,G50392}\leq33.9‰$ junto ao fundo, compreendidas entre os $22.5\leq\overline{S}_{G50392}\leq33.3‰$ na coluna de água e entre os $22.5\leq\overline{S}_{s,G50392}\leq32.9‰$ na superfície dos escoamentos. Estabeleceram que esta estação esteve abrangida pelo domínio ZC_{BS} entre as 9.90h e as 15.40h, e pela ZM nas restantes fases da maré. Na enchente, o registo da ocorrência de $\overline{S}_{s,G50392}=30‰$ por volta das 9.90h, considerada no âmbito deste trabalho como correspondente ao limite superior do domínio ZC de Kjerjve (1987) ou Fairbridge *in* Brown *et al* (1989), teve lugar cerca de 3.44h após a estofa da BM precedente e cerca de 2.48h antes da estofa da PM seguinte. Considerando a velocidade média desta fase da maré de $\overline{u}_{e,G50392}=-0.20$m/s, estes períodos de tempo terão reflectido respectivamente deslocamentos médios para jusante desta estação de 2.5km e para montante de 1.8km, posicionando o domínio marinho na BM muito próximo aos molhes externos da foz do estuário, numa posição coincidente com a obtida em $R_{ZC,BM,CP,Emb}$. Na preia-mar,

posicionou $R_{ZC,PM,BS}$≈4.8km (quadro 5.3.1. 1). Este ciclo de maré foi caracterizado por uma estratificação e mistura do tipo bem misturado (III), com $n_{s,G50392}$≈0.01, $R_{i,G50392}$≈0.09 e com $R_{iE,G50392}$≈0.60, indiciando uma dinâmica para o braço sul dominada pela maré, que foi distinta da registada no canal principal.

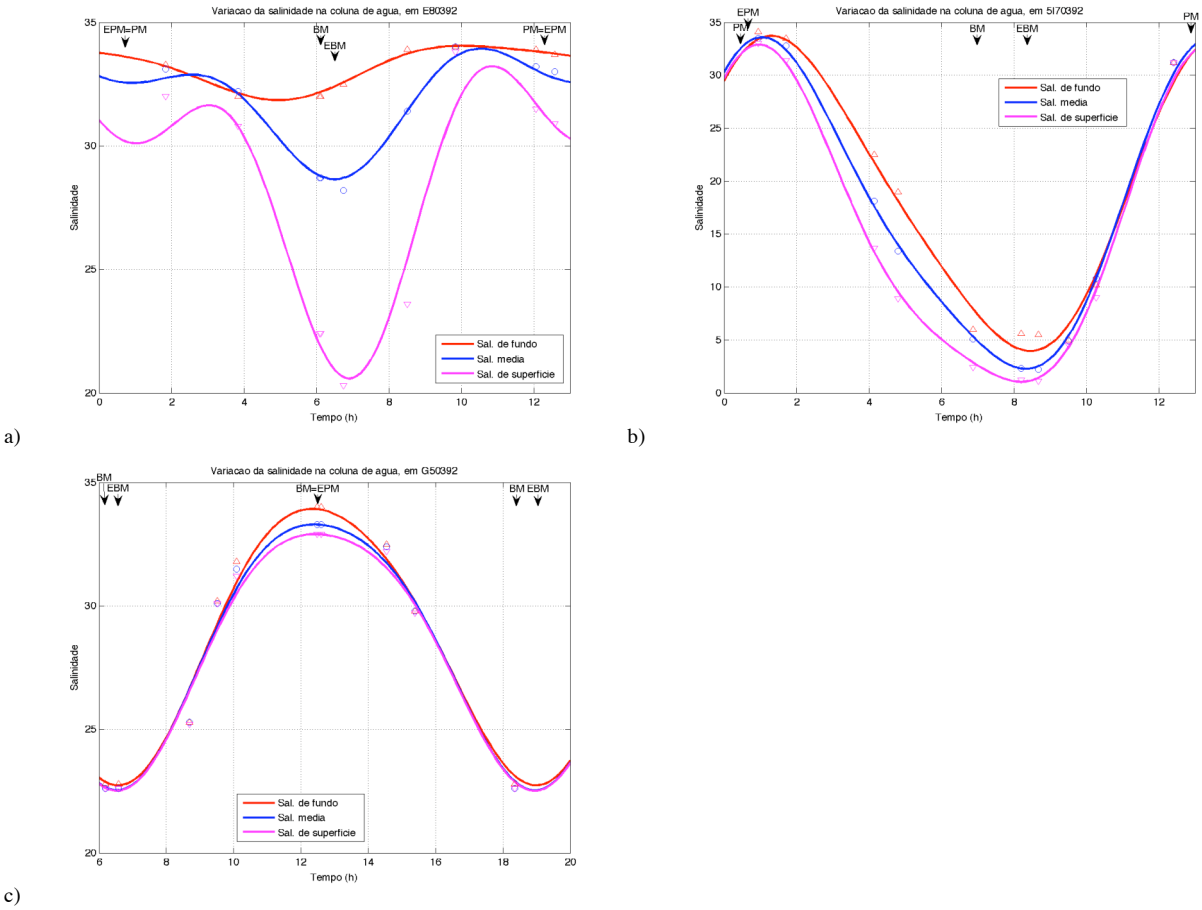


Figura 5.3.1. 13. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E80392, b) Cinco Irmãos com 5I70392, c) na Gala com G50392, referentes à campanha de campo 5-80392, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Descreveram quadros parcialmente misturados (quase bem misturados) nas duas estações do canal principal e bem misturados para a estação do braço sul.

A série de dados maregráficos obtidos na estação da Embocadura, no âmbito da campanha de campo de 19-22/05/93, decorreu sob uma maré de altura $A_{w,Emb}$=1.4m e descargas médias do Mondego de $Q_{r,Emb}$=91m^3/s. Foi obtida a série de dados E190593 com a referência de campo E61-E75. A análise do gráfico a) da figura 5.3.1. 15 permitiu constatar que a salinidade nesta estação variou junto ao fundo entre os $28.8 \leq \overline{S}_{b,E190593} \leq 34$‰, na coluna de água entre os $15.4 \leq \overline{S}_{E190593} \leq 31.2$‰ e à superfície entre os $0 \leq \overline{S}_{s,E190593} \leq 23.4$‰. Desta forma possibilitou enquadrar

esta estação fundamentalmente na ZM_{CP}, com excepção para a fase final da enchente e inicio da vazante, que foi representada pela ZC_{CP}, pois ostentou $\overline{S}_{E190593} \geq 30‰$. Sob estes regimes fluviais elevados a ZC_{CP} passou a ser composta por duas massas de água, uma marinha e outra de mistura que se restringiu aos 2-3m da superfície. Identificando temporalmente na referida figura a ocorrência do limite superior da ZC_{CP} (com $\overline{S}_{E190593}=30‰$) na fase da enchente, como tendo tido lugar pelas 10.90h, esta distou 3.68h da estofa da BM_{Emb} precedente e ficou a 1.37h da estofa da PM_{Emb}. Permitiu de acordo com Harleman (1971) *in* Miranda *et al* (2002) estimar as distâncias médias percorridas pela ZC para jusante e montante desta estação, respectivamente em 3.7km e 1.3km, e posicionar $R_{ZC,BM,CP}$ fora da boca do estuário e $R_{ZC,PM,CP}$=2.6km, considerando a velocidade longitudinal média desta fase de $\overline{u}_{e,E190593}$=-0.27m/s (quadro 5.3.1. 1). Sob esta maré morta e regimes elevados do Mondego, esta estação foi definida por uma estratificação elevada e uma mistura muito pequena do tipo I, quando representada pela ZM (segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco, 1992). Quando abrangida pela ZC_{CP}, a estação da Embocadura apresentou regimes parcialmente misturados e uma estratificação moderada, do tipo II. O parâmetro de estratificação quando integrado para a totalidade deste ciclo de maré determinou $n_{s,E190593}$=1.10 e consequentemente apontou para um regime de cunha salina, do tipo I, e de acordo com Dyer (1989), Darbyshire & West (1992) e Chant & Wilson (2000) ao ostentar $R_{i,E190593}$=1.1 e $R_{iE,E190593}$=3.7 definiu condições de turbulência insuficientes de gerar mistura vertical e perturbar a estratificação de densidade e apontou para uma dinâmica do CP dominada pelos regimes fluviais, tendo ocorrido fenómenos de arrastamento na zona de interface de água mais densa para a massa de água fluvial (Quadro 5.3.1. 1).

Nesta estação da Embocadura, a primeira hora da enchente foi caracterizada por uma circulação estuarina clássica. A massa de água marinha de fundo (mais densa) movimentava-se no sentido da enchente enquanto à superfície, em toda a largura do canal, circulava em sentido de vazante uma fina massa de água de mistura, menos densa de espessura que rondava os 1.5 a 2m. Por

volta das 11h50m (hora local, ou pelas 8.65h relativamente à origem do tempo da análise harmónica) passou pela estação da Embocadura uma frente em forma em ">" que se deslocou durante esta fase inicial da enchente ao longo do canal distal da embocadura, de acordo com o esquema a) da figura 5.3.1. 14. Com o evoluir da maré esta frente desdobrou-se em duas, uma resultante da confluência da massa de água de mistura de superfície em movimento de vazante proveniente do braço norte com a marinha e a segunda resultante da massa de água de mistura proveniente do braço sul (esquema b) da figura 5.3.1. 14). A separá-las, registou-se uma estreita massa de água marinha na superfície que se deslocava no sentido da enchente. A baixa salinidade da camada superficial agora enquadrada nos sectores central e norte do CP resultou dos processos de arrastamento sofridos ao longo do braço norte por parte dos caudais do rio Mondego, enquanto o desenvolvimento longitudinal curvilíneo do braço norte, canalizou estes escoamentos de superfície para a margem direita do CP, neste sector distal do estuário. Com o evoluir da enchente (figura 5.3.1. 14.c), a massa de água marinha passou a propagar-se pela parte central e sul do CP, enquanto a parte norte. Este quadro dinâmico permaneceu até final da enchente. Nesta estação da Embocadura a estofa da preia-mar apresentou um atraso muito pequeno na coluna de água, assim como a preia-mar e a estofa da preia-mar praticamente coincidiram no tempo. Com o início da vazante, a massa de água de mistura proveniente do braço norte começou a empurrar para fora do estuário a massa de água marinha, dando origem a uma frente em forma de ">" na sua interface, que por sua vez se deslocou progressivamente no sentido da foz (esquema d) da figura 5.3.1. 14). Nesta fase, muito embora o braço sul já se apresentasse em fase de vazante, parte dos escoamentos de vazante do sector sul do canal principal sofreram um desvio para o sector mais distal do braço sul, ocupando os 2m superficiais e formando uma frente à superfície. A massa de agua de mistura proveniente do braço sul escoou por de baixo desta interface e foi canalizado para o sector sul do canal principal, neste sector proximal da embocadura.

Por não ter sido possível nesta campanha obter uma série de dados maregráficos na estação dos Cinco Irmãos, inviabilizou a determinação das posições relativas da ZM_{CP} na PM_{5I} e na BM_{5I} pelo método proposto por Harleman (1971) *in* Miranda *et al* (2002). Contudo, adoptaram-se os limites da ZM determinados com recurso à análise do perfil longitudinal P155-P164 (figura 5.3.1. 35) realizado sob $A_{w,IH,P155P164}$=2.4m, $Q_{r,APC,P155P164}$=91m^3/s e sob uma pressão atmosférica de 1022mbar que definiram condições hidrodinâmicas e atmosféricas muito similares a $A_{w,IH,E190593}$=2.1m, $Q_{r,APC,E190593}$=118m^3/s com uma pressão atmosférica de 1020mbar.

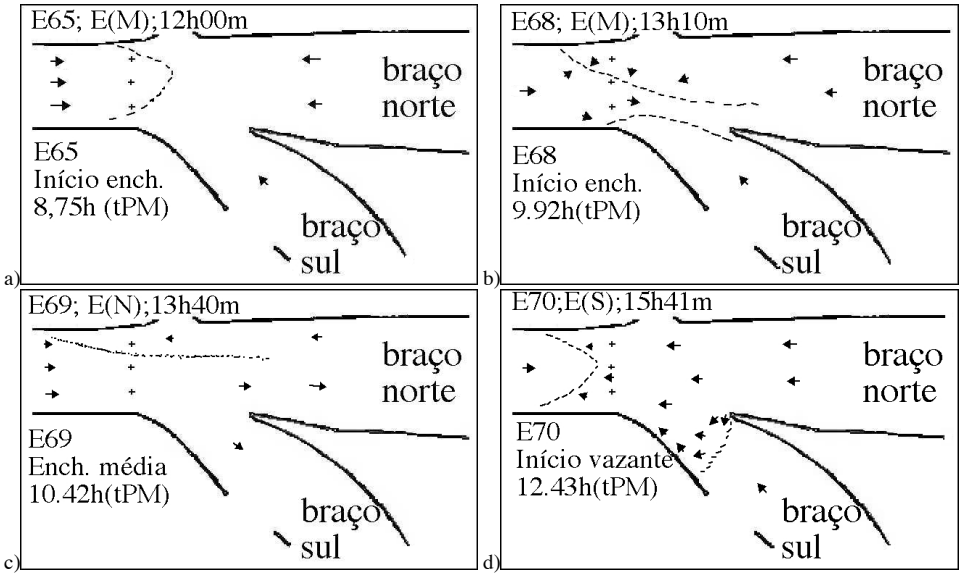
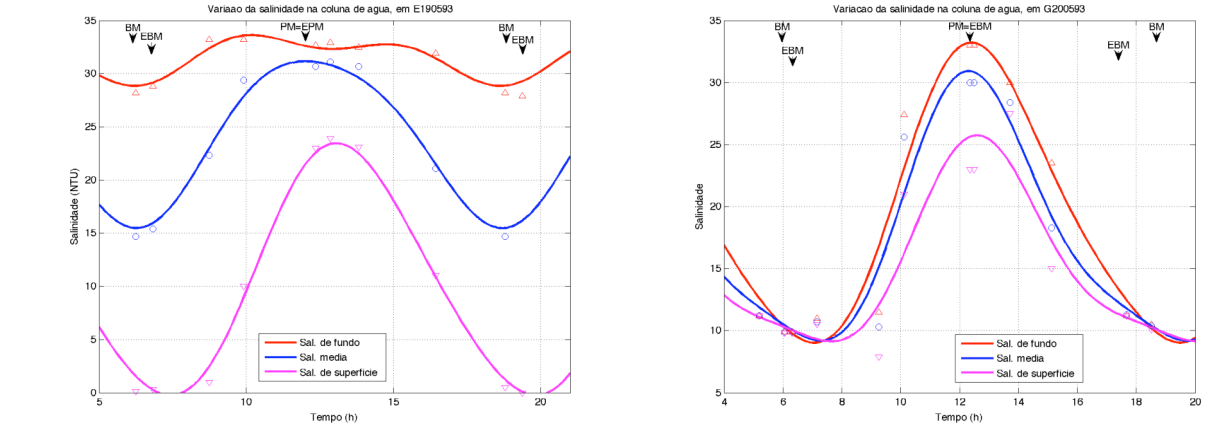


Figura 5.3.1. 14. Frentes que se formaram no sector distal do canal principal do estuário, junto à estação da Embocadura, durante a fase da enchente e princípio da vazante. Os esquemas a), b) e c) referem-se à fase da enchente, enquanto o esquema d) à fase inicial da vazante. A frente em forma de ">" que se registou na zona da estação da Embocadura, relacionou-se com a confluência de massas de água que se propagaram com sentidos praticamente opostos. A maré propagou-se praticamente em oposição aos escoamentos de vazante provenientes do Mondego, fazendo-se a primeira sentir com maior intensidade pelo sector sul, enquanto os segundos pelo sector central e norte do canal principal. Acresceu o facto de a massa de água de vazante proveniente do braço sul se ter propagado preferencialmente pelo sector sul do CP. Esta frente reflectiu a transição entre o domínio marinho, ZC, com a zona de mistura, ZM.

A estação Elevatória esteve apenas sujeita à maré dinâmica, tendo sido enquadrada no domínio ZF_{CP}. A análise do gráfico b) da figura 5.3.1. 15, representativo da variação da salinidade ocorrida ao longo do ciclo de maré na estação da Gala em G200593, permitiu constatar que junto ao fundo as variações estiveram compreendidas entre os $9 \leq \overline{S}_{b,G200593} \leq 23.2$‰, nos escoamentos médios entre os $9.2 \leq \overline{S}_{G200593} \leq 30.9$‰ e à superfície estiveram compreendidas entre os $9.1 \leq \overline{S}_{s,G200593} \leq 25.7$‰. Desta forma, determinaram um domínio da ZM_{BS}, muito embora apenas na proximidade da preia-

mar, entre as 11.7h e as 12.9h o domínio marinho tenha abrangido esta estação. Considerando a ocorrência da estofa da PM pelas 12.33h e uma velocidade média da enchente de $\overline{u}_{e,G200593}$ =-0.23m/s, determinou-se o deslocamento médio sofrido pela ZC_{BS} para montante desta estação em 0.5km nas 0.63h terminais da enchente, permitindo localizar $R_{ZC,PM,BS}$≈3.5km (quadro 5.3.1. 1). Quanto ao deslocamento sofrido pela ZC_{BS} na restante fase da enchente, verificou-se que ele terá sido da ordem dos 5km, o que permitiu posicionar $R_{ZC,BM}$ fora do braço sul. Apenas na fase terminal da vazante se registaram padrões de mistura e estratificação bem misturados, do tipo III, tendo prevalecido nas restantes fases da maré, os regimes parcialmente misturados do tipo II, de acordo com Geyer *et al* (2000). Este ciclo de maré foi definido por magnitudes médias de $n_{s,G200593}$≈0.18, de $R_{i,G200593}$≈0.31 e de $R_{iE,G200593}$≈0.45, representativas de uma estratificação vertical pequena de densidade e de uma dinâmica do braço sul dominada pela maré, mas distinta da do canal principal.



a) b)

Figura 5.3.1. 15. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E190593 e b) na Gala com G200593, referentes à campanha de campo 19-220593, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar. A estação da Embocadura apresentou um quadro do tipo cunha salina, enquanto a Gala do tipo parcialmente misturado.

Na estação da Gala, durante a fase da vazante, foi registada uma frente compreendida entre os pontos de amostragem G(M) e G(N) que diferenciava duas massas de água de mistura provenientes de sectores distintos do troço médio do braço sul (figura 5.3.1. 16). Esta apresentava uma disposição longitudinal sensivelmente paralela ao troço de canal distal do braço sul, mas dissipava-se a uns 50m a jusante da estação da Gala. Distinguia a massa de água de mistura provida de um

tempo de residência de um ou mais ciclos de maré neste braço e que ficou confinada ao sector norte do troço médio do braço sul, da massa de água de mistura que entrou neste subsistema na fase de enchente anterior e que se posicionou fundamentalmente no sector sul dos troços médio-proximal deste braço.

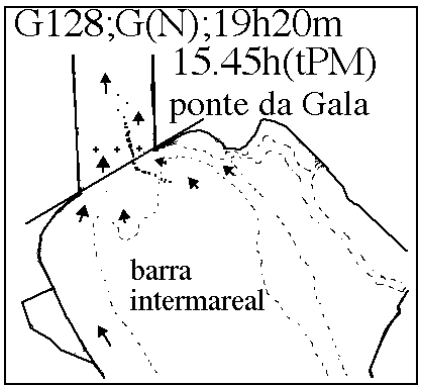


Figura 5.3.1. 16. Frente registada na estação da Gala durante a fase da vazante do ciclo de maré G200593. Esta, enquadrou-se entre os pontos de amostragem G(M) e G(N), diferenciando no sector norte uma massa de água de mistura que apresentava um tempo de residência de um ou mais ciclos de maré no braço sul, da massa de água do sector sul que tinha entrado neste subsistema na anterior fase da enchente.

A campanha de 4-7/02/93, foi composta por uma série de dados maregráficos E70293 obtida na estação da Embocadura, tendo sido representativa de uma maré de altura $A_{w,EMb}\approx 2.6$m e caudais médios do Mondego de $Q_{r,Emb}\approx 124 m^3/s$. A variação da salinidade nesta estação representada no gráfico a) da figura 5.3.1. 19, permitiu constatar que aquela variou junto ao fundo entre os $32.1\leq \overline{S}_{b,E70293}\leq 34.7‰$, na coluna de água entre os $23.4\leq \overline{S}_{E70293}\leq 33.7‰$ e à superfície entre os $9.2\leq \overline{S}_{s,E70293}\leq 32.3‰$, permitindo enquadrar esta estação no domínio marinho (ZC_{CP}) no final da enchente a 2.06h da estofa da PM_{Emb} e nas primeiras 3.24 horas da vazante, e na ZM nas restantes fases da maré. O domínio ZC nesta estação foi composto por uma massa de água marinha de fundo mais densa e nos dois metros superficiais por uma massa de água de mistura, ambas caracterizadas com movimentos segundo o mesmo sentido. A partir do método de Harleman (1971) *in* Miranda *et al* (2002), foi possível estimar as posições relativas do domínio marinho na BM_{CP} e na PM_{CP}, apartir da determinação das distancias relativas percorridas por este domínio da foz para esta estação, e desta estação para montante. Estas, foram calculadas respectivamente em 2.4km e em 2km considerando a velocidade média da enchente ($\overline{u}_{e,E70293}$=-0.25m/s), e ponderando a ocorrência do

limite superior da ZC_{CP} (com $\overline{S}_{E70293} \approx 30‰$) na estação da Embocadura às 10.6h, que foi distante 2.84h da estofa da BM_{Emb} precedente e 2.06h da estofa da PM_{Emb} (gráfico a) da figura 5.3.1. 19). As referidas distâncias possibilitaram posicionar o $R_{ZC,BM}$ fora da boca do estuário e $R_{ZC,PM,CP}$=3.2km, ponderando uma distância relativa de 1.9km da estação da Embocadura à foz do estuário (quadro 5.3.1. 1). Sob o domínio do ZC_{CP} a ≈±1h da PM_{Emb} apresentou uma mistura e estratificação do tipo I (bem misturado) enquanto sob a influencia da ZM_{CP} ostentou uma mistura e uma estratificação do tipo II. Quando avaliado todo o ciclo de maré, definiu um $n_{s,E70293}$=0.50, com $R_{i,E70293}$=0.34 e com $R_{iE,E70293}$=0.78 que foram representativos de regime parcialmente misturado e de uma estratificação moderada, do tipo II, de acordo com Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002), Unesco (1992) e Geyer *et al* (2000). De acordo com a classificação de Dyer (1997) o valor de $n_{s,E70293}$ já definiu um quadro muito estratificado do tipo I.

Nesta série de dados E70293 obtida na estação da Embocadura, também se verificou que na fase terminal da enchente foram registadas duas frentes resultantes da confluência e não mistura de massas de água distintas. Uma que ocupou metade do canal, entre o sector central e a parte norte do canal, e apresentou uma forma em "\". Representou a confluência à superfície da massa de água marinha com a de mistura proveniente do braço norte. A outra frente que se formou, localizou-se no sector mais distal do braço sul e resultou da confluência de parte da massa de mistura proveniente do braço norte em sentido de vazante que sofreu um desvio para o sector mais distal do braço sul. Esta convergiu obliquamente com a massa de água proveniente do braço sul, também já em vazante neste sector do estuário, como se representa no esquema a) da figura 5.3.1. 17. No esquema b) da figura 5.3.1. 17 representa-se a frente que resultou a junção das duas anteriores quando as duas massas de água de mistura provenientes dos dois braços do estuário se ligaram. Os pontos de amostragem E(N) e E(S) passaram a estar em fase inicial de vazante, enquanto o central [E(M)] ainda em fase terminal da enchente por esta frente ter apresentado uma forma em ">". Para além de detritos, espuma e fragmentos vegetais que compunham estas frentes, as massas de água marinha e

de mistura para além de terem apresentado sentidos de propagação distintos e opostos, apresentam tonalidades distintas, apresentando as segundas maior turbidez. Aspectos fisiográficos condicionaram a génese e a forma destas frentes neste sector do estuário, designadamente ao corresponder a uma zona de confluência entre os dois braços mais importantes do estuário, que por sua vez reflectiram morfologias distintas.

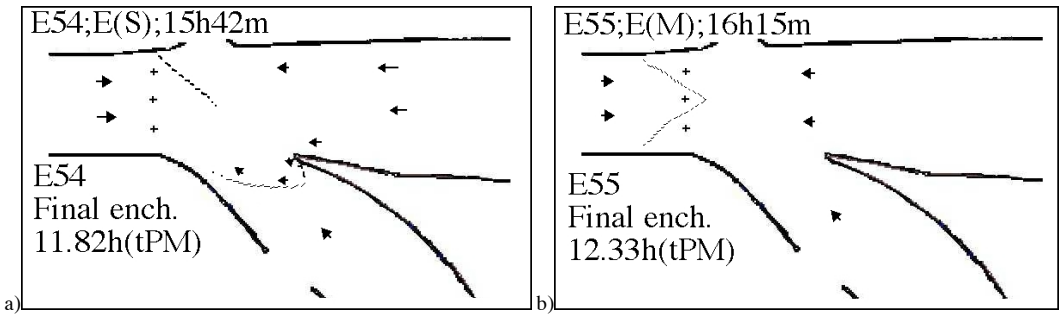


Figura 5.3.1. 17. Frentes que se formaram junto à estação da Embocadura, na fase terminal da enchente e princípio da vazante. Estas frentes relacionaram-se com a confluência e não mistura à superfície da massa de água marinha com as de mistura provenientes quer do braço norte, quer do braço sul. Esta frentes resultaram de um confronto de massas de água que se propagavam com sentidos praticamente opostos. Reflectiram igualmente a transição à superfície entre o domínio marinho, ZC, e a zona de mistura, ZM.

Para determinar a variação longitudinal da ZM_{CP} nesta campanha de campo, procedeu-se à análise do gráfico b) da figura 5.3.1. 19 que representou a série de dados obtida na estação dos cinco Irmãos em 5I40293. A interpretação do gráfico desta figura permitiu enquadrar a estação dos Cinco Irmãos apenas na ZM, uma vez que ostentou variações da salinidade compreendidas entre os $0.1 \leq \overline{S}_{b,5I40293} \leq 29.6‰$ junto ao fundo, entre os $0 \leq \overline{S}_{5I40293} \leq 27.2‰$ na coluna de água, e entre os $0 \leq \overline{S}_{s,5I40293} \leq 23.2‰$ à superfície dos escoamentos. Também permitiu verificar que aquando da BM o limite superior da maré salina coincidiu com esta estação, tendo apresentado salinidades nulas no decorrer da estofa da BM, pelo que se considerou $R_{ZM,BM,CP}$=7.5km. Uma vez que a enchente neste local teve uma duração de 5.53h e foi caracterizada por uma velocidade média longitudinal da ordem dos $\overline{u}_{e,5I40293}$=-0.24m/s estimou-se o deslocamento longitudinal médio ocorrido durante esta fase em $L_{ZM,BM\text{-}PM,CP} \approx 4.8$km e consequentemente posicionou-se $R_{ZM,PM,CP}$=12.3km (quadro 5.3.1. 1). Esta maré viva sujeita a moderadas descargas do Mondego foi caracterizada durante a enchente e na BM por um grau de mistura muito elevado e simultaneamente por um grau da estratificação muito

pequeno, do tipo III segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992), que esteve associado aos processos advectivos inerentes à entrada da maré (Dyer, 1973; Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002)). Na PM e durante a fase da vazante apresentou regimes do tipo parcialmente misturado e de cunha salina (tipos II e I), representativos de um incremento relativo da estratificação e de um decréscimo da mistura turbulenta na coluna de água, de acordo com Chant & Wilson (2000). Quando integrado para todo o ciclo de maré, o parâmetro de estratificação definiu um regime parcialmente misturado com $n_{s,5I40293}\approx0.73$, de acordo com Unesco (1992) e o valor médio dos números de Richardson de todos os perfis com $R_{i,5I40293}\approx1.8$ e $R_{iE,5I40293}\approx1.01$ *sensus* Darbyshire & West (1992) e Unesco (2002) descreveram uma estratificação da densidade vertical estável que se terá sobreposto à turbulência, com uma dinâmica dominada pelos regimes fluviais (Quadro 5.3.1. 1). De acordo com Dyer (1997) este quadro já define um tipo I.

Durante o registo desta série de dados maregráficos (5I40293), na estação dos Cinco Irmãos foi também observada uma frente que se formou mesmo em frente à confluência com o braço sul, na fase de maior altura da coluna de água. Este troço de canal nesta altura ainda não se apresentava regularizado. No final da enchente, pelas 12.25h (hora relativa ao *datum* da analise harmónica) a massa de água movimentava-se ao longo do CP, arrastando para montante a massa de água de mistura, mais túrbida, proveniente do sector mais proximal do braço sul, bem junto à margem esquerda, de acordo com esquema a) da figura 5.3.1. 18. Com a mudança da maré à superfície, esta massa de água proveniente do braço sul passou a ser arrastada para jusante, bem junto à margem esquerda do CP, em conformidade com o esboço b) da figura 5.3.1. 18. Durante a transição da fase da enchente para a vazante não foi identificada visualmente nenhuma frente, há semelhança de quadros já descritos anteriormente para este sector do estuário. Tal facto relacionou-se com a elevada mistura longitudinal e transversal ocorrida neste quadro de muito elevado hidrodinamismo definido por uma maré viva de $A_{w,Emb}\approx2.5$m e regimes do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}\approx124 m^3/s$.

A análise do gráfico c) da figura 5.3.1. 19, que é representativo da variação da salinidade ocorrida em diferentes níveis da coluna de água na estação da Gala em G60293, permitiu realçar que aquela sofreu variações em magnitude compreendidas entre os $15.8 \leq \overline{S}_{b,G60293} \leq 34.6‰$ nos escoamentos junto ao fundo, entre os $14.1 \leq \overline{S}_{G60293} \leq 34.1‰$ para os escoamentos médios e entre os $11.7 \leq \overline{S}_{s,G60293} \leq 30.4‰$ para os escoamentos de superfície.

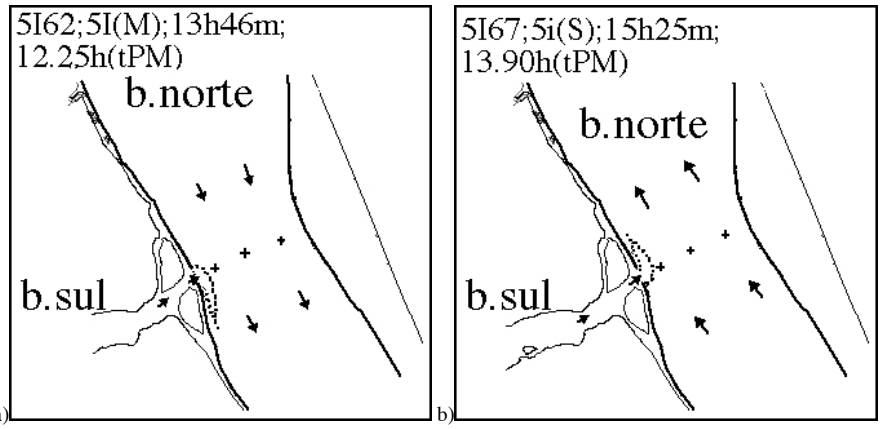


Figura 5.3.1. 18. Frentes que foram observadas aquando do registo da série de dados 5I40293 na estação dos Cincos Irmãos. O esquema a) refere-se à fase final da enchente, aquando da leitura do perfil vertical 5I62 determinado no ponto central do canal, 5I(M), pelas 13h46m hora local, ou às 12.25h hora relativa ao *datum* da análise harmónica. O esquema b) é relativo à fase inicial da vazante, aquando da leitura do perfil 5I67 determinado no ponto sul desta estação, 5I(S), determinado às 15h25m locais, ou às 13.90h relativamente ao *datum* da análise harmónica. Na primeira representação a frente formada junto à extremidade do braço sul foi arrastada para montante junto à margem esquerda do canal principal (CP), enquanto no segundo esquema a frente foi arrastada para jusante da estação dos Cinco Irmãos.

Estes resultados permitiram determinar que esta estação foi abrangida pelo domínio ZC_{BS} durante a enchente, ente as 10.9h e a estofa da PM_{Gala} que teve lugar às 12.56h, tendo este período reflectido um deslocamento médio da ZC_{BS} para montante da estação da Gala da ordem dos 1.5km, considerando uma velocidade média longitudinal da ordem dos $\overline{u}_{e,G60293} \approx -0.25$m/s. Este deslocamento permitiu estimar o alcance máximo atingido por ZC_{BS} na PM em $R_{ZC,PM,BS} \approx 5$km (quadro 5.3.1. 1). A fase precedente da enchente terá sido responsável por um deslocamento médio de ZC_{BS} da ordem dos 3.5km, pelo que se inferiu que $R_{ZC,BM}$ terá estado localizado fora da boca do estuário, à semelhança do constatado na estação da Embocadura em E70293. Durante a fase inicial da vazante o domínio marinho ainda abrangeu esta estação até por volta das 15.55h. Fora destes períodos, durante o final da enchente e princípios da vazante, esta estação foi dominada pela ZM_{BS}.

Este ciclo de maré foi definido por um padrão de mistura e estratificação distinto ao registado no canal principal do estuário, ao ter ostentado magnitudes médias de $n_{s,G200593}$=0.18, de $R_{i,G200593}$=0.31 e de $R_{iE,G200593}$=0.45, que foram representativas de um regime parcialmente misturado e condições de turbulência que se sobrepuseram à estratificação de densidade gerando mistura vertical, à semelhança do considerado por Darbyshire & West (1992) e Geyer *et al* (2000).

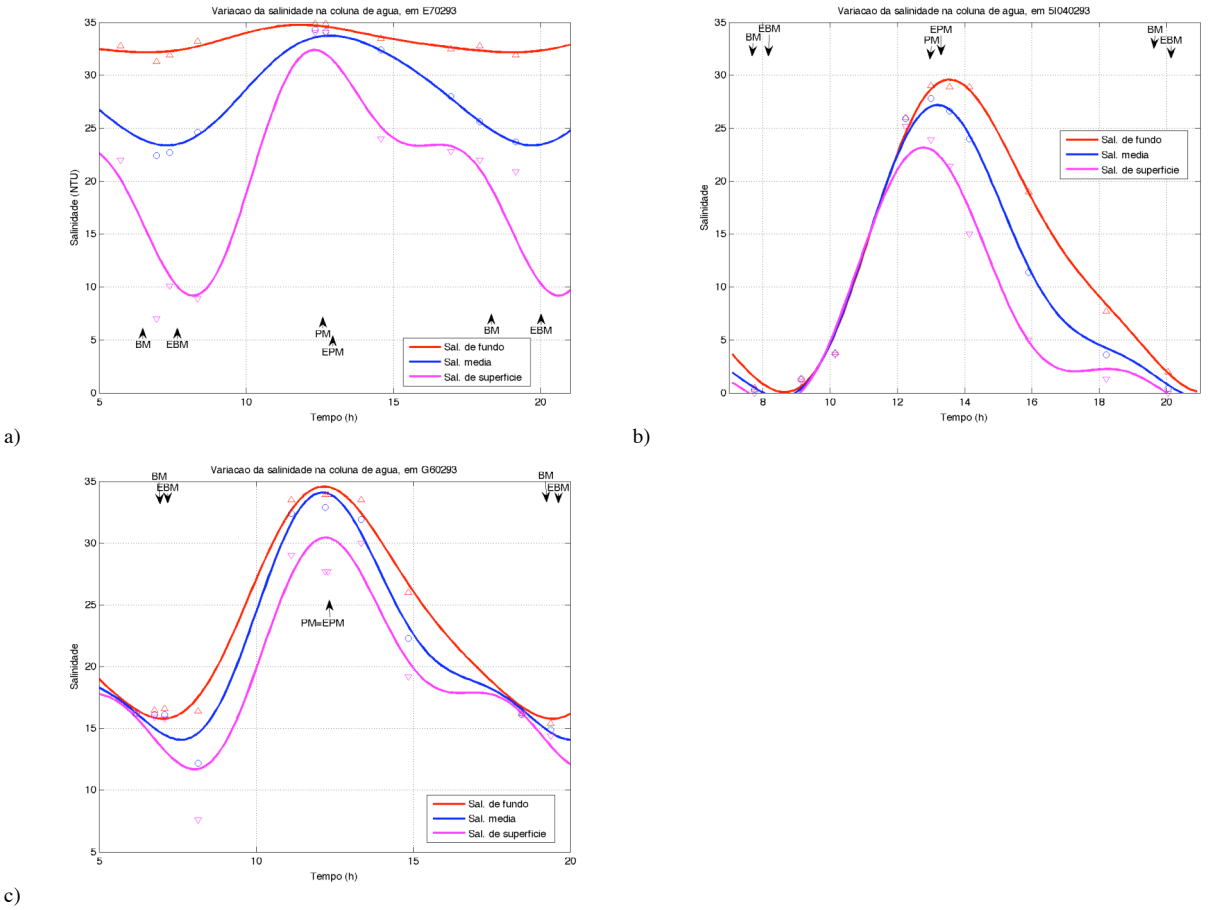


Figura 5.3.1. 19. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E70293, b) Cinco Irmãos com 5I40293, c) na Gala com G60293, referentes à campanha de campo 4-70293, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Estes diagramas definiram regimes parcialmente misturados.

As séries de dados maregráficos obtidas durante a campanha de 11-15/11/93, na estação da Embocadura (E111193) decorreram sob marés vivas de $A_{w,EMb}$=2.3m, descargas médias do Mondego de $Q_{r,Emb}$=155m^3/s (quadro 5.3.1. 1). A correspondente variação da salinidade, expressa graficamente na figura 5.3.1. 21.a, evidenciou variações daquela compreendidas entre os $29 \leq \overline{S}_{b,E111193} \leq 33.5$‰ junto ao fundo, entre os $10 \leq \overline{S}_{E111193} \leq 29$‰ para os escoamentos médios e entre

os $0 \leq \overline{S}_{s,E111193} \leq 7.4‰$ à superfície, possibilitando enquadrar esta estação na ZM_{CP}. A ocorrência de salinidades médias máximas próximas dos 30‰ (com $\overline{S}_{E111193}=29‰$) perto da PM_{Emb}, permitiu que se considerasse que o limite superior da ZC terá coincidido praticamente com esta estação, com $R_{ZC,PM,CP} \approx 1.3km$. O deslocamento médio que a ZC_{CP} terá sofrido durante a fase de enchente ao longo do CP foi da ordem dos 4.5km, posicionando $R_{ZC,BM,CP}$ para fora da boca do estuário, considerando a duração média de 4.77h e uma velocidade de $\overline{u}_{e,E111193}=-0.26m/s$ (quadro 5.3.1. 1). Verificou-se igualmente que a variação da salinidade não se apresentou em fase com a variação quer da superfície livre, quer da componente horizontal da maré, em resultado das descargas fluviais consideráveis e dos processos de mistura dai decorrentes, de acordo com Dyer (1997). Um outro motivo, terá estado relacionado com o menor ajuste obtido entre a curva da salinidade interpolada e os dados de campo neste contexto hidrodinâmico. Apenas na PM_{Emb} foi representado por uma distribuição de mistura e estratificação parcialmente misturado (do tipo II), resultante de uma mistura turbulenta entre as águas marinhas de enchente com as águas frescas fluviais em movimento em sentido de vazante, definindo uma circulação estuarina clássica, segundo Darbyshire & West (1992). Nas restantes fases da maré, apresentou uma mistura e estratificação do tipo I, definida por uma cunha salina de fundo com origem marinha caracterizada por uma componente horizontal da maré pequena e por uma mistura vertical muito fraca. De acordo com Dyer (1973), Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002), Darbyshire & West (1992) e Chant & Wilson (2000) na interface entre estas duas camadas de densidade muito distintas gera-se um forte cizalhamento resultante do movimento diferencial das duas massas de água, que devido aos processos de arrastamento deslocam massas de água marinha para a parte superior do escoamentos, criando nesta, um gradiente longitudinal de salinidade em direcção à foz e gradientes verticais praticamente muito pequenos ($\partial S/\partial z \approx 0‰$). Associam também este quadro, a uma hidrodinâmica dominada pelos caudais fluviais, que em parceria com processos de arrastamento desempenham um papel primordial nos processos de mistura, dado que a difusão turbulenta terá sido praticamente

insignificante. O parâmetro de estratificação e o número de Richardson representativos de todo o ciclo de mar, ao ostentarem magnitudes de $n_{s,E111193}\approx1.60$, de $R_{i,E111193}\approx2.9$ e de $R_{iE,E111193}\approx4.0$ determinaram respectivamente um regime do tipo I de acordo com Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992), e condições de turbulência insuficientes para gerar mistura vertical, verificando-se uma estratificação elevada e estável (quadro 5.3.1. 1). Na zona de interface, terá ocorrido de acordo com os referidos autores, arrastamento da água mais densa para a massa de água fluvial.

O domínio hidrodinâmico por parte das descargas do Mondego neste ciclo de maré, também foi corroborado pelo registo de uma frente localizada entre os dois braços (próximo da estação da Embocadura) aquando de meados da fase da vazante. Parte da massa de água de mistura em movimento de vazante junto à margem esquerda do CP, deslocou-se para o sector mais distal do braço sul impedindo que a massa de água superficial também em movimento de vazante se deslocasse directamente para o sector sul do canal principal. Esta obstrução efectuou-se apenas na parte superficial dos escoamentos, drenando para o sector sul do canal principal na parte mais profunda do escoamento, a massa de água de vazante proveniente do braço sul. Esta confluência de massas de água distintas e com movimentos diferenciais, gerou a frente esquematizada na figura 5.3.1. 20, que reflectiu gradientes de pressão longitudinais (de natureza barotrópica e com origem fluvial) em direcção ao mar muito distintos entre estes dois canais, que foi muito mais elevado no canal principal. Importa também realçar o não registo visual de uma frente semelhante à descrita no esquema c da figura 5.3.1. 14, tanto que foram medidas à superfície, durante a fase da enchente, velocidades de vazante nos primeiros 2m superficiais dos escoamentos no perfil E(N) e velocidades de enchente medidas simultaneamente nos perfis E(M) e E(S). Estes elementos reflectiram o escoamento em sentido de vazante de uma massa de água de mistura[6] pelo sector norte do canal da estação da Embocadura durante praticamente toda a fase da enchente, sem que contudo tenha sido

[6]. Associado a processos de arrastamento sofridos pela massa de água do Mondego ao longo do braço norte.

visualmente identificada à superfície qualquer tipo de disposições longitudinal de espuma ou de detritos flutuantes, de acordo com e Uncles *et al* (1999) e Mied *et al* (2000). Este aspecto ter-se-á devido às condições hidrodinâmicas vigentes muito elevadas (de maré viva e elevadas descargas do Mondego) que terão sido responsáveis por um forte mistura lateral neste canal estreito, de largura da ordem dos 165m.

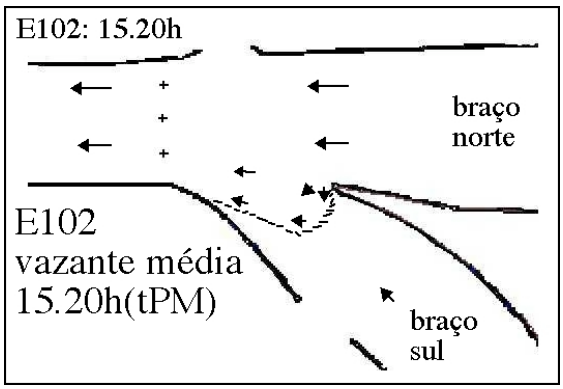


Figura 5.3.1. 20. Frente que se formou no sector distal do braço sul em resultado da confluência da massa de água de mistura em movimento de vazante junto à margem esquerda do canal principal, com a massa de água de mistura proveniente do braço sul. Apenas os primeiros dois metros superficiais da primeira massa de água sofreram um desvio para o sector mais distal do braço sul, impedindo desta forma que a massa de água superficial também em movimento de vazante do braço sul se deslocasse directamente para o sector sul do canal principal. A drenagem par ao canal principal apenas se processou na restante parte do escoamento.

A série de dados maregráficos obtida na estação dos Cinco Irmãos com a referência 5I141193, cuja variação temporal da salinidade na coluna de água se encontra representada graficamente na figura 5.3.1. 21.b, permitiu constatar que as variações daquela foram da ordem dos $0 \leq \overline{S}_{b,5I141193} \leq 27.2‰$ junto ao fundo, dos $0 \leq \overline{S}_{E111193} \leq 20.1‰$ na média e dos $0 \leq \overline{S}_{s,5I141193} \leq 2.9‰$ à superfície dos escoamentos. Estes resultados enquadraram esta estação no ZF no final da vazante e princípio da enchente, respectivamente entre as 7.60h e as 9.55h, e na ZM nas restantes fases do ciclo de maré. Ponderando que durante a vazante o limite superior da ZM teve lugar nesta estação pelas 7.60h, e que aquela se deslocou para jusante até pelo menos à estofa da BM (≈8.77h), foi possível numa primeira fase estimar esta distância percorrida em 1.3km, considerando uma velocidade média desta fase de $\overline{u}_{v,5I141193}$=0.30m/s e posteriormente posicionar $R_{ZM,BM,CP}$≈6.2km (quadro 5.3.1. 1). O alcance máximo atingido pela ZM neste ciclo de maré, foi estimado, tendo por base o cálculo do deslocamento médio sofrido pela ZM durante a fase da enchente que terá sido da

ordem dos 4.1km, considerando $T_{e,5I141193}$=4.21h e $\overline{u}_{e,5I141193}$=-0.27m/s, permitindo também posicionar $R_{ZM,PM,ZP}$≈10.3km (quadro 5.3.1. 1). A ZM deste ciclo de maré foi caracterizada por uma mistura e estratificação do tipo I (cunha salina) com $n_{s,5I141193}$≈1.04 e por a estratificação de densidade se sobrepôs às condições de turbulência com $R_{i,5I141193}$≈5 e com $R_{iE,5I141193}$≈3.6 e uma dinâmica regida pelos regimes fluviais, de acordo com Darbyshire & West (1992) e Chant & Wilson (2000). A estação Elevatória enquadrou-se sempre no domínio fluvial, ZF. Para o braço sul, verificou-se através da análise da figura 5.3.1. 21.c, onde se representa graficamente a variação da salinidade na coluna de água registada na estação da Gala durante o ciclo de maré de G121193, que aquela foi representada por magnitudes compreendidas entre os $6.1 \leq \overline{S}_{b,G111193} \leq 34.4$‰ para os escoamentos junto ao fundo, entre os $7.5 \leq \overline{S}_{G111193} \leq 31.9$‰ para os escoamentos médios e entre os $4.0 \leq \overline{S}_{s,G111193} \leq 20.1$‰ para os escoamentos de superfície. Entre as 11.40h e as 13.10h, esta estação esteve representada pelo domínio ZC, enquanto nas restantes fases deste ciclo de maré, pela ZM. Considerando que durante a enchente o limite superior de ZC alcançou esta estação pelas 11.40h e que até à estofa da PM decorreram ainda 1.02h, a maré durante este espaço de tempo terá percorrido um deslocamento médio para montante da ordem dos ≈1.1km considerando uma velocidade média longitudinal de $\overline{u}_{e,G121193}$ ≈-0.29m/s. Este deslocamento de ZC permitiu estimar a sua posição relativa máxima em $R_{ZC,PM,BS}$≈4.1km (quadro 5.3.1. 1). Este ciclo de maré representativo da dinâmica do braço sul, foi caracterizado por magnitudes médias de $n_{s,G121193}$=0.38, de $R_{i,G121193}$=0.63 e de $R_{iE,G121193}$=0.76, que apontaram para um tipo de mistura e estratificação parcialmente misturado e para condições de turbulência que se sobrepuseram à estratificação de densidade, gerando mistura vertical *sensus* Dyer (1989), Darbyshire & West (1992), Unesco (1992) e Geyer *et al* (2000). Quando analisados os diferentes perfis verticais que compuseram este ciclo de maré, constatou-se que apenas durante o final da vazante foram registados regimes bem misturados na Gala, enquanto os restantes foram do tipo parcialmente misturados.

A série de dados maregráficos obtida na estação da Embocadura durante a campanha de 5-9/12/93 foi composta por um número insuficiente de leituras para a aplicação da análise harmónica que por sua vez não permitiu a determinação nem da variação da superfície livre nem a magnitude das descargas fluviais locais, como também, bem como interpolar harmonicamente a variação da salinidade média e compará-la com as diferentes fases da maré.

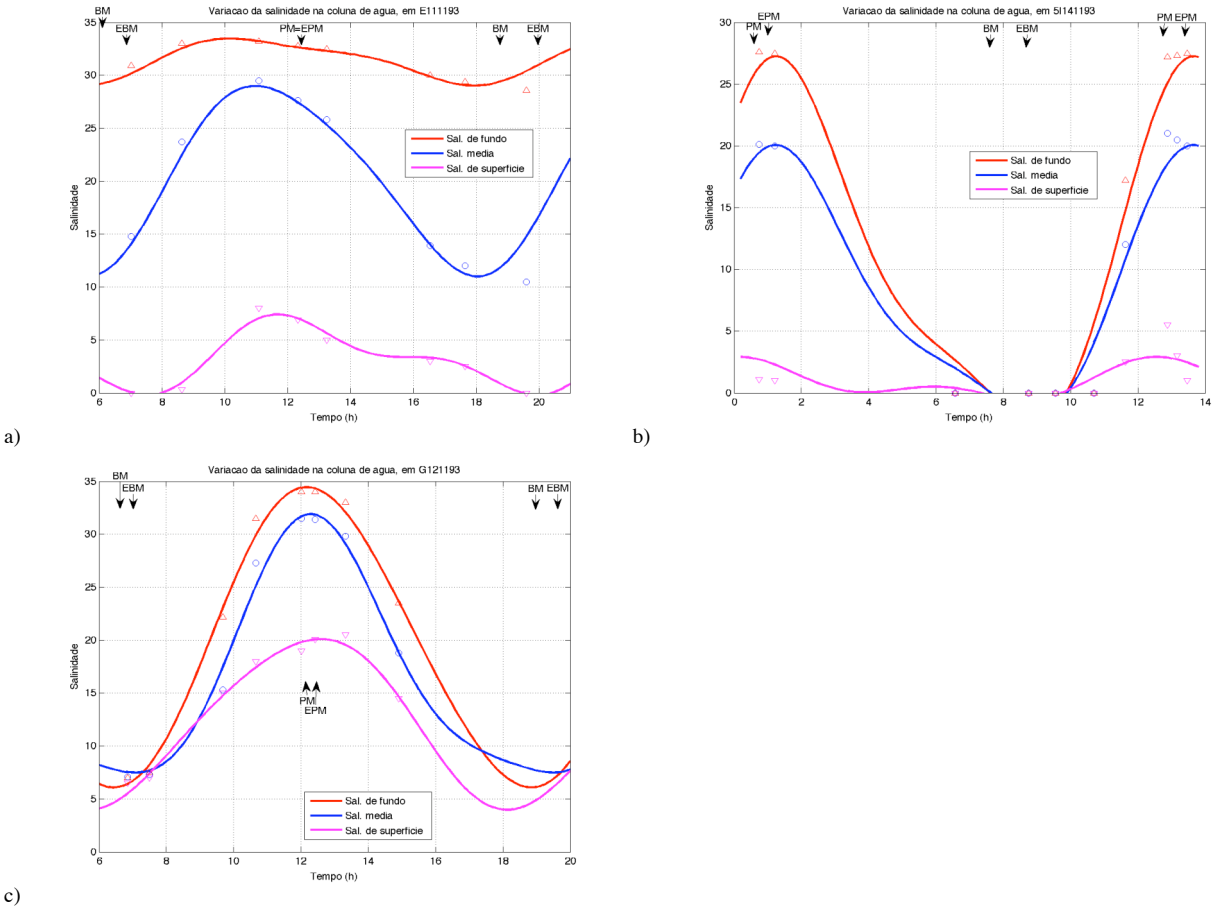


Figura 5.3.1. 21. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com a referência E111193, b) Cinco Irmãos com 5I141193, c) na Gala com a G121193, referentes à campanha de campo 11-151193, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Definiram regimes do tipo cunha salina para o canal principal e parcialmente misturado para o braço sul.

Muito embora esta série de dados não tenha sido representativa de um ciclo completo de maré, ela decorreu em E81293, e permitiu que fosse elaborado um diagrama de variação temporal das isohalinas de acordo com o gráfico a) da figura 5.3.1. 23, que foi representativo de uma maré de $A_{w,IH}$=1.9m e de descargas médias do Mondego da ordem dos $Q_{r,APC}$=56.6m^3/s. Da análise deste gráfico, verificou-se que a salinidade integrada na coluna de água com $\overline{S}_{E81293} \approx 30‰$ teve lugar

durante a enchente por volta das 8.20h, e distou relativamente à estofa da PM precedente um período aproximado a 1.6h que terá sido representativo de um deslocamento médio para montante desta estação da ordem dos 1.7km, posicionando $R_{ZC,PM,CP}\approx3.0$km (quadro 5.3.1. 1). Considerando uma duração média da vazante de $T_{v,E81293}\approx6.8$h e uma velocidade média de $\overline{u}_{v,E81293}=0.27$m/s, tornou-se possível estimar o deslocamento médio sofrido pela ZC durante esta fase, da ordem dos 6.4km e posicionar $R_{ZC,BM,CP}$ ao largo da foz do estuário. Nas fases próximas da preia-mar ($\approx PM_{Emb}\pm1.5$h) esta estação foi dominada pela ZC e definida por quadros de mistura e estratificação do tipo II, parcialmente misturados, de acordo com Geyer *et al* (2000). Nas restantes fases da maré foi representada pela ZM e por regimes muito estratificados do tipo I, de cunha salina com $n_{s,E81293}\approx1.40$ e definidos por uma estratificação estável com $R_{i,E81293}\approx1.6$ de acordo com Dyer (1989) e Chant & Wilson (2000). Para a determinação da variação longitudinal da ZM no CP, analisou-se a série de dados referente às leituras de salinidade obtidas durante o ciclo de maré aferido na estação dos Cinco Irmãos em 5I51293, e que se encontra representada graficamente na figura 5.3.1. 23.b. Da observação deste gráfico foi possível constatar que a variação da salinidade junto ao fundo esteve compreendida entre os $16.4\leq\overline{S}_{b,5I51293}\leq24.6$‰, nos escoamentos médios entre os $2.7\leq\overline{S}_{5I51293}\leq12.4$‰ e à superfície entre os $0\leq\overline{S}_{s,5I51293}\leq1.1$‰, o que permitiu enquadrar esta estação na ZM. Uma vez que a salinidade na BM rondou os $\overline{S}_{5I,BM,51293}\approx2.7$‰ por volta das 7.2h, possibilitou posicionar o limite superior da $ZM_{BM,CP,5I51293}$ um pouco acima desta estação, aproximadamente a 0.5km (quadro 5.3.1. 1), definindo $R_{ZM,BM,CP}\approx8.0$km. Esta distância longitudinal ao canal foi estimada com base no cálculo do percurso médio percorrido pela maré, se por ventura a vazante se prolongasse por mais 0.5h e atingisse os $\overline{S}_{5I}\approx0$‰ por volta das 7.7h considerado um comportamento linear na sua variação e uma velocidade média desta fase de $\overline{u}_{v,5I51293}=0.29$m/s (gráfico b) da figura 5.3.1. 23). O deslocamento médio sofrido pela ZM durante a fase da enchente terá sido da ordem dos 2.4km, considerando uma velocidade média $\overline{u}_{e,5I51293}=-0.15$m/s e o período

de $T_{e,5I51293}$≈4.48h desta fase, que quando acrescido à posição relativa de $R_{ZM,BM,CP}$, possibilitou enquadrar $R_{ZM,PM,CP}$≈10.4km (quadro 5.3.1. 1). O tipo de mistura e estratificação apresentado da salinidade na coluna de água foi do tipo cunha salina (tipo I) segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e de acordo com os limites definidos em Unesco (1992). Também se verificou que as condições de turbulência não foram suficientes para gerar mistura vertical, uma vez que $R_{i,5I512193}$≈3.8 e $R_{iE,5I512193}$≈5.5 definiram uma estratificação elevada e estável *sensus* Chant & Wilson (2000), e uma dinâmica do canal principal regulada pelas descargas do Mondego (Quadro 5.3.1. 1).

Durante o registo desta série de dados 5I51293, na fase de maior altura da coluna de água não foi observada qualquer frente no sector sul da estação dos Cinco Irmãos, relacionada com a drenagem da massa de água de mistura proveniente do sector mais proximal do braço sul. O estrangulamento causado na secção molhada da extremidade do braço sul com a regularização deste sector do estuário permitiu apenas a saída de uma pequena parte da referida água, mesmo sob uma maré viva de $A_{w,5I51293}$≈2m. Contudo, na fase oposta da maré, foi registada uma frente no canal principal que abrangeu toda a sua largura e apresentou uma disposição na diagonal ao canal, com uma forma em "/", de acordo com a figura 5.3.1. 22.

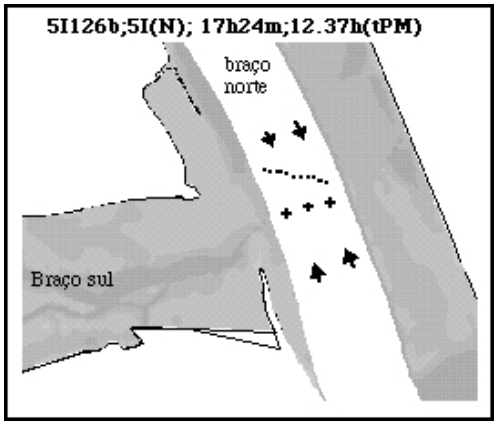


Figura 5.3.1. 22. Frente que se formou no canal principal, na zona dos Cincos Irmãos, aquando da entrada da maré na fase inicial da enchente, em 5I51293. A massa de água em movimento segundo o sentido da enchente empurrou para montante as massas de água de mistura e fluvial que se apresentavam em fase terminal da vazante.

Resultou da entrada maré e da consequente confluência da massa de água em fase de enchente com as massas de água de mistura e fluvial em fase terminal de vazante. A sua forma reflectiu um domínio das correntes de enchente pelo sector norte neste troço do CP.

O registo de salinidades nulas e da acção da maré dinâmica em EE61293, permitiu enquadrar a estão Elevatória no domínio ZC. A análise do gráfico c) da figura 5.3.1. 23 onde se representa a variação da salinidade na coluna de água registada na estação da Gala durante o ciclo de maré de G91293, permitiu determinar variações daquela compreendidas entre os $12.5 \leq \overline{S}_{b,G91293} \leq 32.6‰$ para os escoamentos de fundo, entre os $12.3 \leq \overline{S}_{G91293} \leq 29.6‰$ para os escoamentos médios e entre os $12.1 \leq \overline{S}_{s,G91293} \leq 25.9‰$ para os escoamentos de superfície.

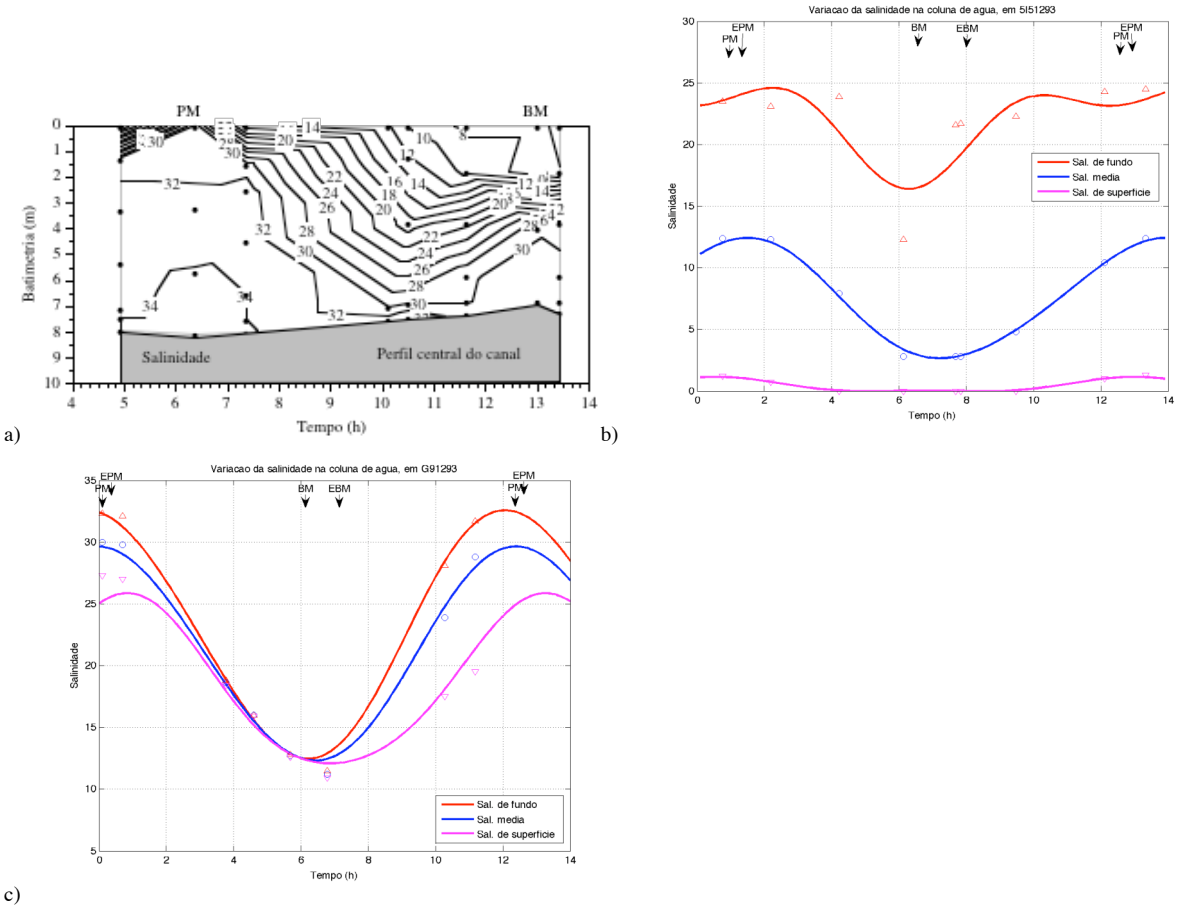


Figura 5.3.1. 23. Variação da salinidade junto ao fundo, à superfície e na coluna de água nos ciclos de maré aferidos nas seguintes estações do estuário: a) Embocadura com E81293, b) Cinco Irmãos com a referência 5I51293, c) na Gala com G91293, referentes à campanha de campo 5-91293, no perfil central do canal. As abreviaturas PM e BM representam a ocorrência das preia-mar e baixa-mar, enquanto EPM e EBM as respectivas estofas. Definiram regimes do tipo cunha salina para o canal principal e parcialmente misturado para o braço sul.

Estes resultados enquadraram a estação da Gala na zona de mistura, muito embora o registo de salinidades médias de ≈30‰ às 12.40h permitiu considerar que o domínio ZC alcançou esta estação na preia-mar, e posicionar $R_{ZC,PM,BS} \approx 3km$ relativamente à foz (quadro 5.3.1. 1). Da observação do gráfico c desta figura também se constatou que durante a fase da enchente, preia-mar

e durante a fase inicial da vazante, esta estação foi definida por padrões de mistura e estratificação parcialmente misturados (tipo II, segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002)), enquanto durante a fase da vazante por padrões bem misturados, do tipo III. Quando analisado todo o ciclo de maré, constatou-se que as magnitudes médias obtidas de $n_{s,G91293}$=0.19, de $R_{i,91293}$=0.31 e de $R_{iE,91293}$=0.70, apontaram para uma mistura e estratificação parcialmente misturada e para condições de turbulência que se sobrepuseram à estratificação de densidade, gerando mistura vertical *sensus* Geyer *et al* (2000).

Foram realizadas mais três campanhas de campo apenas na estação da Gala por esta apresentar uma boa acessibilidade, uma localização geográfica no sector distal do estuário, e por ter uma profundidade e por um hidrodinamismo baixos quando comparadas com as restantes estações do estuário. Corresponderam a três séries de dados maregráficos obtidas nos ciclos de maré realizados em 6/12/91, em 20/12/91 e em 6/02/95, sob as referencias G61291, G201291 e G60295, e cujas variações da salinidade se encontram representadas graficamente na figura 5.3.1. 24. Estes decorreram sob condições hidrodinâmicas locais de $A_{w,G61291}$=1.8m, $Q_{r,G61291}\approx 12m^3/s$, de $A_{w,G201291}$=1.8m, $Q_{r,G201291}\approx 30m^3/s$ e de $A_{w,G60295}$=1.2m, $Q_{r,G60295}\approx 34m^3/s$, respectivamente, como se ilustra no quadro 5.3.1. 1. Para o primeiro ciclo de maré, verificou-se que o comportamento da salinidade representado no gráfico a) da figura 5.3.1. 24 determinou variações compreendidas entre os $22.6\leq \overline{S}_{b,G61291}\leq 34.1‰$ para os escoamentos de fundo, magnitudes compreendidas entres os $22.3\leq \overline{S}_{G61291}\leq 33.1‰$ para os escoamentos médios e variações incluídas entre os $19.4\leq \overline{S}_{s,G61291}\leq 32.3‰$ para os escoamentos de superfície. Determinaram também que o domínio ZC alcançou esta estação por volta das 10h, passadas 3.67h da estofa da BM e 2.44h antes da estofa da PM subsequente. Considerando uma velocidade longitudinal média da enchente de $\overline{u}_{e,G61291}$=-0.23m/s, estes dois períodos terão representado deslocamentos médios de ≈3km e de ≈2km respectivamente, apontando para que na BM o domínio ZC se tenha localizado fora do braço sul, e na PM tenha alcançado os $R_{ZC,PM,BS}\approx 5km$ (quadro 5.3.1. 1). Os parâmetros $n_{s,G61291}$=0.07,

$R_{i,G61291}$=0.22 e $R_{iE,G61291}$=0.21 estabeleceram um regime bem misturado (tipo III segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) para o braço sul e condições de turbulência que geraram uma forte mistura vertical *sensus* Dyer (1989). A análise do gráfico b) da figura 5.3.1. 24 determinou variações de salinidade compreendidas entre os $17.6 \leq \overline{S}_{b,G201291} \leq 33.7‰$ junto ao fundo, magnitudes compreendidas entres os $17.5 \leq \overline{S}_{G201291} \leq 33.2‰$ para os escoamentos médios e variações abrangidas entre os $17.6 \leq \overline{S}_{s,G201291} \leq 32.8‰$ para os escoamentos de superfície.

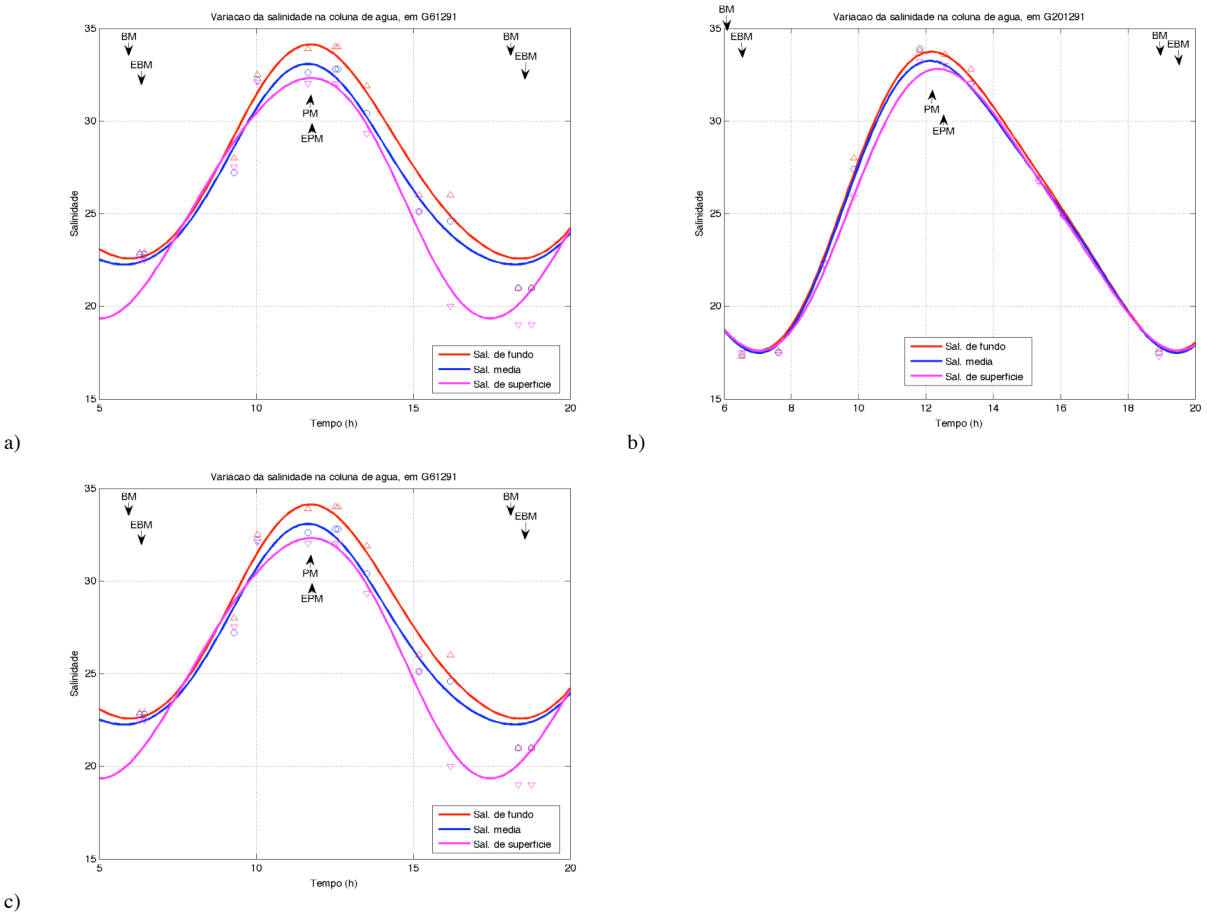


Figura 5.3.1. 24. Variação da salinidade registada junto ao fundo, à superfície e na coluna de água durante os ciclos de maré aferidos na estação da Gala, no perfil central do canal, nas campanhas: a) G61291, b) G201291 e c) G60295. As designações PM e BM representam a as preia-mar e baixa-mar, enquanto as EPM e EBM a ocorrência das respectivas estofas. Definiram regimes do tipo bem misturados para o braço sul.

O domínio ZC alcançou a Gala por volta das 10.7h, distando 3.91h da estofa da BM precedente e ficando a 1.67h da estofa da PM subsequente. Permitiu estimar as distâncias médias percorridas a jusante desta estação em 3.5km, e para montante em 1.5km, localizando ZC na BM fora do sector distal braço sul e na PM $R_{ZC,PM,BS} \approx 4.5$km, considerado a velocidade média de

$\overline{u}_{e,G201291}$=-0.25m/s desta fase de enchente. Apresentou uma mistura e estratificação do tipo bem misturado com $n_{s,G201291}$=0.02, $R_{i,G201291}$=0.18 e $R_{iE,G201291}$=0.43 (quadro 5.3.1. 1).

O ciclo de maré G60295 foi caracterizado por variações de salinidade compreendidas entre os $13.9 \leq \overline{S}_{b,G60295} \leq 33.8$‰ junto ao fundo, por magnitudes compreendidas entres os $10.9 \leq \overline{S}_{G60295} \leq 30.3$‰ para os escoamentos médios e por variações abrangidas entre os $8.2 \leq \overline{S}_{s,G60295} \leq 22.1$‰ para os escoamentos de superfície, de acordo com o gráfico c) da figura 5.3.1. 24. Por volta das 11.9h foi registada nesta estação a passagem do limite superior do domínio ZC (com $\overline{S}_{G60295} \approx 30$‰), que aconteceu 5h depois do início da enchente e 0.64h do seu *terminus*. Considerando um período de $T_{e,G60295} \approx 5.64$h e uma velocidade média longitudinal de $\overline{u}_{e,G60295}$=-0.12m/s, a maré terá percorrido durante esta fase uma distância longitudinal média da ordem dos 2.4km, que para montante da estação da Gala terá sido de apenas 0.3km (quadro 5.3.1. 1). Este ciclo de maré foi igualmente definido por um tipo de mistura e estratificação parcialmente misturado com $n_{s,G60295}$=0.36 e $R_{i,G60295}$=0.65 denotando paralelamente condições de turbulência incapazes de geral mistura vertical (Darbyshire & West, 1992; Geyer *et al,* 2000).

Comportamento Histerético da Densidade

Quando analisadas as curvas histeréticas da variação da densidade (ou da salinidade) correspondentes na estação da Embocadura, constantes no gráfico a) da figura 5.3.1. 25, verificou-se que sigma-t apresentou-se em fase com a variação da superfície livre aquando de marés muito baixas e sob reduzidas descargas fluviais. Foi exemplo o ciclo de maré de E100893 que decorreu sob uma maré de $A_{w,Emb} \approx 0.8$m e sob $Q_{r,Emb} \approx 27 m^3/s$, registando-se a densidade mais baixa aquando da BM e a mais elevada aquando da PM. Para ciclos de marés mortas, mas de maior amplitude, com $A_{w,E150392} \approx 1.3$m e com $A_{w,E80392} \approx 1.5$m (sob $Q_{r,E150392} \approx 37 m^3/s$ e $Q_{r,E80392} \approx 26 m^3/s$) passou-se a verificar que as densidades (ou salinidades) máximas passaram a ter lugar aproximadamente a 0.3h e a 1.4h antes da PM, e as densidades de menor magnitude ocorreram a 0.2h e a 0.4h depois da BM,

respectivamente. Estes desfasamentos registados entre a densidade e a variação da superfície livre terão estado relacionados com a complexa mistura ocorrida naquelas fases extremas da maré, que também foi corroborada com a formação de frentes que resultaram da confluência entre as massas de água marinha e a de mistura, com sentidos de propagação opostos (figuras 5.3.1. 12 e 5.3.1. 9). Ainda em marés mortas (com $A_{w,E190593}\approx1.4m$) mas sob descargas do Mondego mais elevadas da ordem dos $Q_{r,E190593}\approx92m^3/s$, verificou-se que a variação da densidade apresentou-se praticamente em fase com a variação da superfície livre, uma vez que a magnitude de sigma-t mais baixa coincidiu no tempo com a BM e a densidade de maior magnitude ocorreu 0.2h depois da PM. Este desfasamento de tempo foi coincidente com uma frente que se formou nesta estação no final da enchente, esquematizada na figura 5.3.1. 14. Analisados os regimes que decorreram sob marés vivas e que abrangeram apenas as descargas do Mondego mais elevadas, compreendidas entre os $124\leq Q_{r,Emb}\leq155m^3/s$, verificou-se que em E70293 a variação da densidade apresentou-se em fase com a superfície livre na PM, enquanto na BM a densidade mínima teve lugar cerca de 0.9h depois e foi coincidente no tempo com a formação de uma frente representada na figura 5.3.1. 17. Sob regimes da ordem dos $Q_{r,E111193}\approx155m^3/s$ a variação da densidade apresentou um desfasamento temporal em ambas as fases extremas da componente vertical da maré, da ordem das 1.1h na PM e das 0.3h na BM, mas sem ter estado associada à formação de qualquer frente observada localmente. Em síntese, estes resultados obtidos na estação da Embocadura permitiram relacionar os desfasamentos observados entre a superfície livre e a variação da densidade na PM e na BM quer com descargas muito elevadas do Mondego, quer com a formação de frentes, que por sua vez reflectiram processos de mistura muito complexos entre diferentes massas de água em circulação neste sector distal do estuário. As primeiras terão traduzido condições de mistura verticais e longitudinais muito pequenas, definindo um quadro hidrodinâmico regulando pelas descargas fluviais muito embora tenham decorrido sob marés vivas e que terão condicionado por completo os gradientes quer barotrópico, quer o baroclínico no gradiente longitudinal de pressão no CP. As

frentes terão estado associadas à competição ocorrida entre a maré e as descargas fluviais, deixando de se formar neste sector do estuário aquando de um claro domínio de um destes agentes hidrodinâmicos, como aconteceu aquando de marés mortas sob baixas ou elevadas descargas do Mondego ($Q_{r,E190593}$ e $Q_{r,E190593}$), ou aquando de marés vivas sob a influência de caudais do Mondego de maior magnitude ($Q_{r,E111193}$ e $Q_{r,E81293}$). Terão igualmente contribuído para este comportamento histerético da densidade, aspectos de natureza fisiográfica relacionados com o facto de esta estação ter estado localizada na confluência distal dos dois canais mais importantes do estuário, pelo que também reflectiu durante a vazante a mistura de massas de água distintas provenientes quer do braço norte, quer do braço sul.

À semelhança do que se verificou na estação anterior, nos Cinco Irmãos a variação da densidade também se apresentou em fase com a superfície livre em marés de baixa amplitude e sob reduzidas descargas fluviais, com $A_{w,5I140392}\approx1.2$m e $Q_{r,5I140392}\approx3m^3/s$, de acordo com o gráfico b) da figura 5.3.1. 25. Sob descargas do Mondego um pouco superiores, na ordem dos $28\leq Q_{r,5I}\approx50m^3/s$, as densidades de maior magnitude continuaram a apresentar-se em fase com a PM, indiciando um domínio por parte da maré nos processos de mistura nesta fase terminal da enchente. Já nas fases de menor altura da coluna de água, as densidades de menor magnitude aconteceram após a BM, mas não em fase com a componente horizontal da maré. Aquando de descargas do Mondego mais elevadas, na ordem dos $109\leq Q_{r,5I}\approx142m^3/s$ os desfasamentos registados entre estas duas componentes passou também a estender-se à fase de maior altura da coluna de água, começando as densidades máximas a ter lugar após a PM, com atrasos que rondaram as 1.4h. Estes passaram também a estar associados à formação de frentes que definiram a transição entre os finais da enchente e as fases iniciais da vazante, representadas nas figuras 5.3.1. 10 e 5.3.1. 22. A análise do comportamento histerético da densidade (ou da salinidade) na estação dos Cinco Irmãos, permitiu determinar que na PM os processos de mistura tenham sido fundamentalmente regulados pela maré, com base na sintonia registada entre sigma-t e a componente vertical da maré aquando de baixas ou

moderadas descargas do Mondego. Na fase de menor altura da coluna de água, apenas sob descargas fluviais muito reduzidas é que se verificou esta sintonia. Contudo, os resultados obtidos apontam para que descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,5I}$>109m^3/s para a fase da PM e da ordem dos $Q_{r,5I}$>28m^3/s para a BM, tenham passado a regular o comportamento histerético da densidade nesta estação localizada na zona de mistura do CPM, passando a apresentar maiores desfasamentos temporais com a componente vertical da maré.

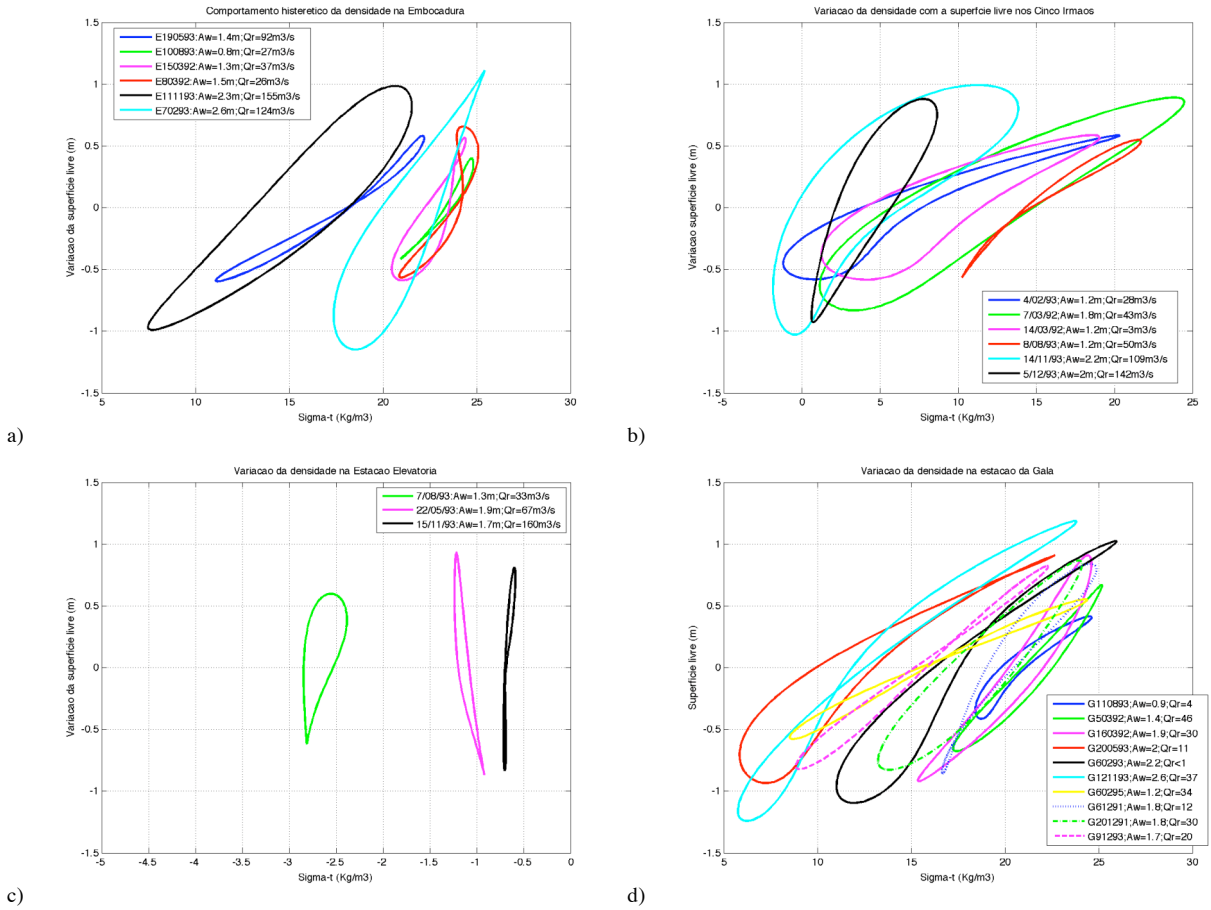


Figura 5.3.1. 25. Comportamento histerético da densidade dos vários ciclos de maré registados nas estações da: a) Embocadura, b) Cinco Irmãos, c) estação Elevatória, d) Gala. Nestes quatro gráficos relacionou-se a variação da superfície livre com a densidade, expressas sob a forma da variação do nível da água relativamente ao nível médio da água com sigma-t.

Tendo por base a análise de apenas três ciclos completos de maré determinados na estação Elevatória, representados no gráfico c) da figura 5.3.1. 25, verificou-se que o comportamento histerético da densidade não se apresentou em fase com a variação da superfície livre neste sector proximal do CP, tendo sido caracterizada por atrasos superiores a 1.3h em cada fase. Houve contudo uma excepção para a BM de EE220593 em que a densidade e a superfície livre coincidiram

no tempo. Desta forma, o comportamento histerético da densidade para além de ter sido primeiramente condicionado pela variação da temperatura da massa de água fluvial do Mondego (com $-2.8 \leq \sigma_{t,EE} \leq -0.6 kg/m^3$), acresceu o facto de este sector do estuário ter sido condicionado na maior parte do tempo apenas pela maré dinâmica.

Quadro 5.3.1. 1. Posições relativas do domínio marinho no estuário aquando da preia-mar ($R_{ZC,PM}$) e aquando da baixa-mar ($R_{ZCB,M}$), bem como da zona de mistura ($R_{ZM,PM}$ e $R_{ZM,BM}$) determinadas para os diferentes ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos e nos perfis longitudinais (PL) efectuados ao longo do canal principal (CP) e do braço sul (BS). Apresentam-se também as distâncias médias longitudinais percorridas pelo domínio marinho (L_{ZC}) e pela zona de mistura (L_{ZM}). Exibem-se igualmente as correspondentes alturas da maré (A_w) e as descargas fluviais (Q_r) determinadas nas várias estações do estuário e as respectivas alturas da maré estimadas pelo Instituto Hidrográfico ($A_{w,IH}$) e descargas do Mondego aferidas no Açude de Ponte em Coimbra ($Q_{r,APC}$). As siglas n_s, $R_{i,}$ e R_{iE} representam os parâmetros de estratificação, de Richardson e de Richardson estuarino. Apresentam-se igualmente, o prisma de maré (P) medido nas diferentes estações do estuário e o prisma de maré geométrico (P_g) determinado apartir dos levantamentos cartográficos vectorizados do estuário.

Ciclos de maré:	Aw (m)	Qr (m3/s)	Aw,IH (m)	Qr,APC (m3/s)	R,ZC,BM (km)	R,ZC,PM (km)	L,ZC (km)	R,ZM,BM (km)	R,ZM,PM (km)	L,ZM (km)	Ns (-)	Ri (-)	RiE (-)	P (m3)	Pg (m3)
Embocadura															
E100893	0.9	27	1.2	12	0.7	4.8	4.1	-	-	-	0.18	0.45	0.57	542566	2875638
E150392	1.3	37	2.1	5	0.0	4.7	5.5	-	-	-	0.23	0.20	0.71	959809	4026547
E80392	1.5	26	1.8	5	0.1	5.5	5.7	-	-	-	0.16	0.20	0.45	1087338	4400419
E190593	1.4	92	2.1	118	0.0	2.6	5.1	-	-	-	1.10	1.10	3.71	790806	3813146
E70293	2.6	124	2.9	16	0.0	3.2	4.4	-	-	-	0.50	0.34	0.78	1579534	6862886
E111193	2.3	155	2.6	200	0.0	1.3	4.5	-	-	-	1.60	2.90	4.05	1262438	5786861
5 Irmãos															
5I140392	1.2	3	1.6	5	-	-	-	9.3	13.9	4.6	0.25	0.22	0.11	982970	1214229
5I40293	1.2	28	2.1	54	-	-	-	7.5	12.3	4.8	0.73	1.80	1.01	841957	961669
5I70392	1.8	43	2.7	5	-	-	-	7.8	13.1	5.2	0.39	0.64	0.75	1629454	1744907
5I80893	1.2	50	1.8	12	-	-	-	11.2	15.0	4.3	0.75	0.22	1.01	568182	820244
5I141193	2.1	109	3.2	124	-	-	-	6.2	10.3	4.1	1.04	5.00	3.58	1378711	1133826
5I51293	2.0	142	2.0	59	-	-	-	8.0	10.4	2.4	3.42	3.80	5.47	724044	918169
Gala															
G61291	1.8	12	2.2	1.3	0.0	5.0	5.0	-	-	-	0.07	0.22	0.21	1077580	1060111
G201291	1.8	30	2.6	0.8	-0.5	4.5	5.0	-	-	-	0.02	0.18	0.43	1070933	1048797
G50392	1.4	46	2.6	0.5	2.5	4.8	4.3	-	-	-	0.01	0.09	0.60	726428	854719
G160392	1.9	30	2.6	0.5	0.2	4.9	4.7	-	-	-	0.02	0.18	0.48	1088400	1139029
G60293	2.3	0	3.0	3.2	-0.5	4.5	5.0	-	-	-	0.19	0.20	0.00	1381452	1317495
G200593	2.0	11	2.3	7.3	-1.5	3.5	5.1	-	-	-	0.18	0.31	0.45	1107420	1150265
G110893	0.9	4	1.1	0.4	1.6	3.8	2.1	-	-	-	0.02	0.21	0.78	204520	514905
G121193	2.6	38	2.9	18.8	-1.6	4.1	5.6	-	-	-	0.38	0.63	0.76	1737677	1490806
G91293	1.7	20	2.0	4.8	-1.4	3.0	4.4	-	-	-	0.19	0.31	0.70	950336	1026139
G60295	1.2	34	1.8	0.5	0.6	3.3	2.4	-	-	-	0.30	0.65	4.68	298709	715583
Perfis longitudinais realizados nos dois canais mais importantes do estuário:															
no Canal Principal, no final da enchente:															
P106-P115 (60693)	-	-	2.6	24	-	7.1	-	7.1	16.0	8.9	0.26	-	-	-	-
P78-P90 (160593)	-	-	1.4	44	-	4.5	-	9.2	11.0	6.5	0.97	1.14	-	-	-
P116-P130 (150893)	-	-	2.2	13	-	5.5	-	5.5	16.6	11.1	0.12	0.67	-	-	-
P170-P175 (221293)	-	-	1.2	103	-	4.5	-	2.8	6.5	3.7	3.3	1.8	-	-	-
P155-P164 (11293)	-	-	2.4	91	-	5.0	-	3.5	9.2	4.2	2.91	2.1	-	-	-
no Canal Principal, no final da vazante:															
P91-P105 (160593)	-	-	1.4	44	0	-	-	9.2	-	9.2	1.52	2.28	-	-	-
P150-P154 (11293)	-	-	2.4	91	0	-	-	3.5	-	3.5	2.87	0.88	-	-	-
Perfis longitudinais realizados no braço sul, no final da enchente:															
P6-P12 (81291)	-	-	2.2	1.5	-	5.5	-	-	-	-	0.03	0.07	-	-	-
P60-P68 (150593)	-	-	1.2	5.4	-	3.5	-	-	-	-	0.32	0.58	-	-	-
Perfis longitudinais realizados no braço sul, no final da vazante:															
P69-P77 (11293)	-	-	1.2	5.4	0	-	-	-	-	-	0.42	-	-	-	-

Da análise das 10 curvas histeréticas da densidade obtidas na estação da Gala, expressas no gráfico d) da figura 5.3.1. 25, foi possível determinar que na PM sigma-t apresentou-se em fase com a superfície livre, indiciando um controle nos processos de mistura por parte da maré nesta fase de maior altura da coluna de água, que também foi corroborado com o alcance nesta fase da maré da massa de água marinha e o domínio ZC. Na fase oposta da maré verificou-se que a densidade de menor magnitude ocorreu sempre um pouco depois da BM, com atrasos que rondaram as 0.2h e as

1.3h, quase em fase com a componente horizontal da maré. Destes, também foi possível constatar que os atrasos de maior magnitude, compreendidos entre as 0.6h e as 1.3h tiveram lugar apenas aquando das marés vivas, pelo que este desfasamento registado entre a densidade e a superfície livre terá também estado relacionada quer com o retardamento de água nos extensos ambientes intermareais dos sectores médio-proximais do braço sul, quer com a abertura esporádica das comportas da Quinta do Canal efectuada apenas durante as fases da vazante e princípios da enchente. O primeiro efeito terá causado um prolongamento do decréscimo da densidade um pouco para além do *terminus* da vazante ao continuar a drenar água de mistura para a estreita faixa de canal sempre imersa, efeito este que foi superior em marés de maior amplitude. O segundo, esteve relacionado com drenagem para o sector proximal do braço sul de água doce proveniente do pranto que terá sido responsável por um prolongamento do decréscimo da densidade nos escoamentos no final da vazante. Estes resultados corroboram uma hidrodinâmica para o braço sul regulada principalmente pela maré, muito embora os extensos ambientes intermareais nos sectores médio-proximal também a tenham condicionado.

Análise de Séries de Dados Referentes a Perfis Longitudinais aos Canais

O estudo da variação longitudinal espacio-temporal dos diferentes domínios dinâmicos (ZC, ZM e ZF) no estuário também foi complementado com a análise de diagramas de variação da temperatura (T), salinidade (S) e da densidade (σ_t) efectuados longitudinalmente ao canal principal e ao longo do braço sul nos finais das fases da enchente e da vazante. Contudo, este tipo de informação apenas pode ser relacionado com a variação da superfície livre estimada pelo Instituto Hidrográfico ($A_{w,IH}$) e com as descargas do Mondego determinadas no Açude de Ponte em Coimbra ($Q_{r,APC}$), dado não ter sido possível dispor de informações locais relativas às magnitudes destes agentes, como aconteceu nas séries de dados hidrográficos obtidas nas quatro estações do estuário. Muito embora o tempo dispendido com a realização de cada perfil longitudinal tenha sido em média da ordem das 2.20h para o CP e das 1.20h para o BS, estes não inviabilizaram a análise da variação

espacial dos vários parâmetros físicos em cada um. Neste item apenas se apresentam os diagramas longitudinais de isotáquias afim de permitir uma análise qualitativa da variação longitudinal da velocidade dos escoamentos nestes perfis e facultar eventuais estudos comparativos entre o comportamento das isotáquias com o das isotérmicas, ou com o das isohalinas ou com o das isopícnicas. Os vários diagramas longitudinais realizados abrangeram diversos quadros hidrodinâmicos representativos de marés de diversas amplitudes e descargas fluviais de várias magnitudes.

O perfil longitudinal P116-P130 foi realizado no dia 15/08/93 ao longo do CP sob uma maré viva de $A_{w,IH}$=2.2m e baixos regimes do Mondego ($Q_{r,APC}\approx12.8m^3/s$). O estudo dos perfis referentes aos vários parâmetros obtidos no campo permitiram posicionar o domínio marinho entre os $0<ZC_{PM,CP}<5.5km$, a zona de mistura entre os $5.5<ZM_{PM,CP}<16.6km$ e o domínio fluvial acima dos $ZF_{PM,CP}>16.6km$, de acordo com Kjerjve (1987) e Fairbridge *in* Brown *et al* (1989) (figura 5.3.1. 27 e quadro 5.3.1. 1). Estes resultados foram corroborados com os resultados obtidos na estação dos Cinco Irmãos em 5I80893 que decorreram sob condições de $Q_{r,APC,5I80893}\approx12m^3/s$ iguais e de $A_{w,IH,5I80893}\approx1.8m$ muito similares, tendo os limites definidos para $ZC_{PM,CP}$ e $ZM_{PM,CP}$ sido praticamente coincidentes, ligeiramente superiores no perfil p116-p130, tanto que este também decorreu sob uma maré com mais 0.2m de altura (quadro 5.3.1. 1). O domínio marinho descrito neste perfil longitudinal foi composto por uma massa de água muito homogénea na coluna de água e definida longitudinalmente por variações compreendidas entre os $30\leq S_x\leq34‰$, $15\leq T_x\leq16ºC$ e $22\leq\sigma_{t,x}\leq25.2kg/m^3$. No primeiro metro junto à superfície, as isopícnicas passaram a ser horizontais, definindo um ligeiro gradiente que foi da ordem dos $(\partial T/\partial z)_{h=1}\approx0.8ºC/m$, $(\partial S/\partial z)_{h=1}\approx3.3‰/m$ e $(\partial\sigma_t/\partial z)_{h=1}\approx2.7kgm^{-3}/m$. Correspondeu a uma fracção da ZM que ficou retida no sector distal do CP e que foi empurrada para a superfície aquando da entrada desta massa de água. Este quadro hidrodinâmico foi corroborado pela ocorrência de uma frente que foi observada no campo entre os perfis Bn2 (a 1km) e Bn4 (a 1.6km) (figura 5.3.1. 26.a) que resultou da não mistura destas massas

de água com densidades diferentes, mas ambas com movimentos de enchente de acordo com Mied *et al* (2000). Entre os perfis verticais realizados em Bn9 (a 5.5km) e Bn9.5 (a 5.9km) (figura 5.3.1. 26), registou-se uma zona de forte turbulência relacionada com fenómenos de convergência resultantes do estreitamento do CP causado por uma grande barra lateral, à semelhança do descrito por Darbyshire & West (1992).

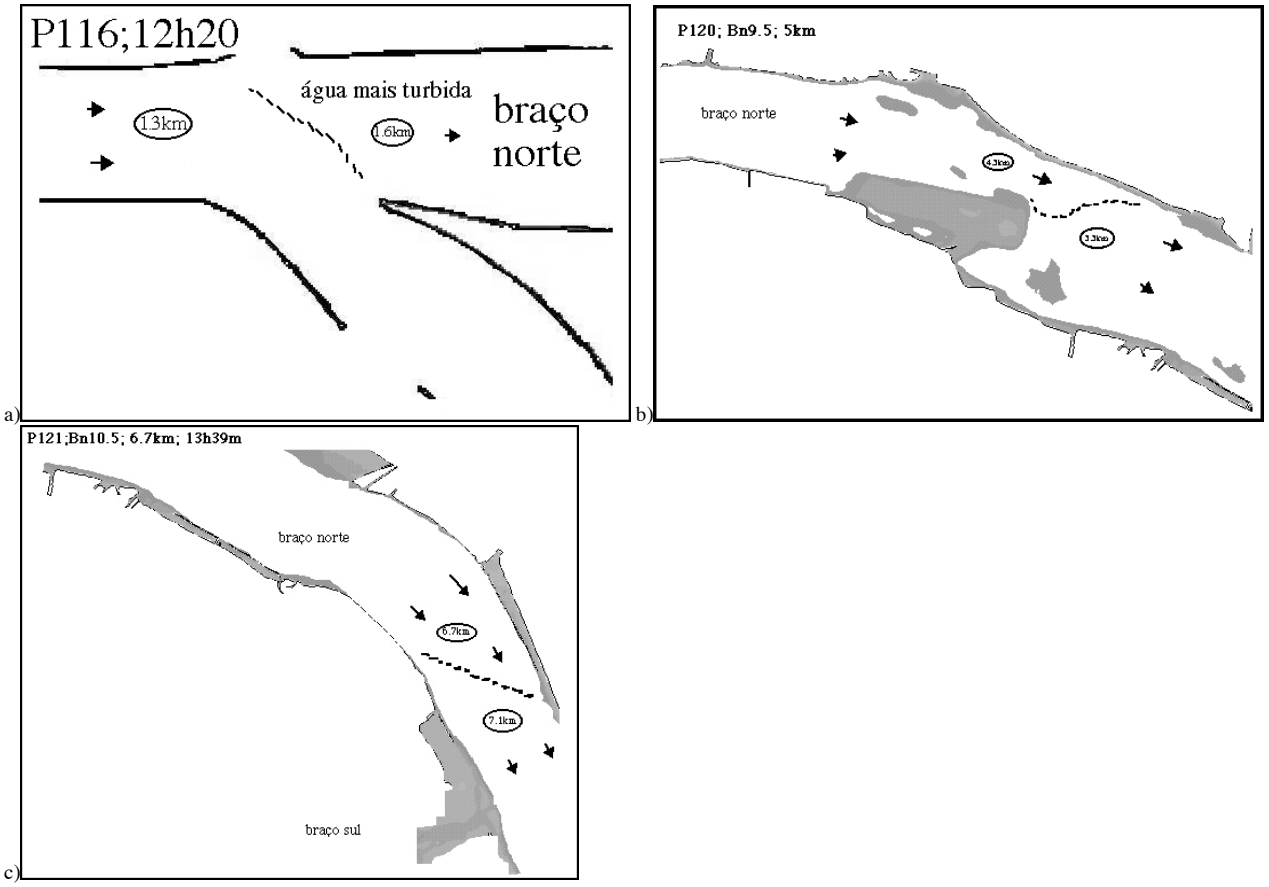


Figura 5.3.1. 26. Frentes registadas aquando do perfil longitudinal ao longo do CP, com a referência P116-P130 realizado no dia 15/08/93, no final da enchente, sob uma maré viva de $A_{w,IH}$=2.2m e baixos regimes do Mondego de $Q_{r,APC}\approx 12.8 m^3/s$. O esquema a) ilustra a frente registada entre os perfis P116 e P117, localizados nos pontos de amostragem Bn3 e Bn4, distantes respectivamente a 1.3km e 1.6km da foz que resultou da não mistura entre as massas de água marinha e a de mistura, com densidades diferentes, mas ambas com movimentos de enchente. O esquema b) representa a frente registada entre os pontos de amostragem Bn9 e a Bn10 (perfis P120 e P121) localizados a 5.5km e a 6.3km da foz, que esteve relacionada com uma zona de forte turbulência devido a fenómenos de convergência resultantes do estreitamento do CP causado por uma grande barra lateral. O esquema c) representou uma frente que se formou entre os perfis P121 e o P122 efectuados em Bn10.5 e Bn11 (6.7km e a 7.1km da foz) e que reflectiu a transição do domínio ZC_{CP} com a ZM_{CP}.

A fazer a transição da ZC_{CP} com a ZM_{CP} entre os perfis Bn9 e Bn9.5, à superfície registou-se uma outra frente esquematizada na figura 5.3.1. 26.c que apresentava uma forma em "/". Para além de ter correspondido a uma zona de forte turbulência, reflectiu a entrada preferencial da maré pela

margem direita neste sector do canal principal que se apresentava ligeiramente encurvado para SSE, à semelhança do constatado no estuário do rio Tweed por Uncles *et al* (1999). Este aspecto hidrodinâmico foi também corroborado com o ciclo de maré 5I80893 obtido na estação dos Cinco Irmãos sob condições hidrodinâmicas similares.

A zona de mistura deste perfil ocupou uma extensão longitudinal da ordem dos 11.5km. Nela foi possível diferenciar dois tipos de comportamento das suas isopícnicas. Designadamente nos 5km distais, as isopícnicas apresentaram-se mais juntas e ligeiramente inclinadas para montante, denotando uma mistura turbulenta e um movimento desta massa de água para montante, de acordo com Darbyshire & West (1992). Nos restantes 5.5km, as isopícnicas apresentaram-se mais espaçadas e praticamente verticais reflectindo uma massa de água verticalmente homogénea. Estes dois sectores da ZM descreveram respectivamente gradientes longitudinais da ordem $(\partial T/\partial x)_{5.5<x<10.5}\approx 0.8ºC/km$, $(\partial S/\partial x)_{5.5<x<10.5}\approx 3.3‰/km$ e $(\partial \sigma_t/\partial x)_{5.5<x<10.5}\approx 2.7kgm^{-3}/km$, e de $(\partial T/\partial x)_{10.5<x<17}\approx 0.5ºC/km$, $(\partial S/\partial x)_{10.5<x<17}\approx 2.4‰/km$ e $(\partial \sigma_t/\partial x)_{10.5<x<17}\approx 1.9kgm^{-3}/km$.

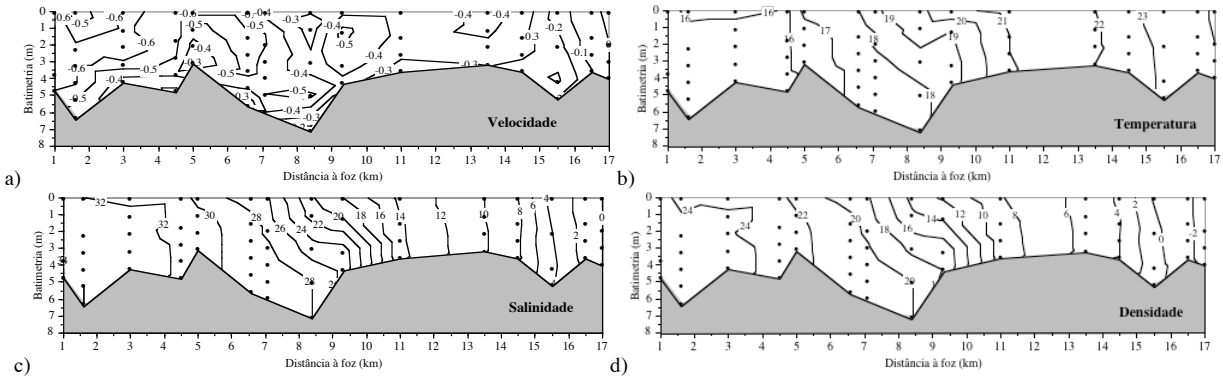


Figura 5.3.1. 27. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 15/08/1993 (referência P116-P130), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas $2kg/m^3$. A zona de mistura descreveu valores médios de $n_{s,ZM,P116\text{-}P130}\approx 0.12$ e de $R_{i,ZM,P116\text{-}P130}\approx 0.67$ que definiram uma estratificação moderada e um regime parcialmente misturado, do tipo II.

A análise do comportamento global das isohalinas e das isotáquias na zona de mistura quando conciliada com as magnitudes médias do parâmetro de estratificação e do número de Richardson que compuseram os 9 perfis verticais da $ZC_{CP,P116\text{-}P130}$, de $n_{s,ZM,P116\text{-}P130}\approx 0.12$ e de $R_{i,ZM,P116\text{-}P130}\approx 0.67$ permitiram determinar uma estratificação moderada e um regime parcialmente misturado,

do tipo II (muito próximo da transição com o tipo III) em que as condições de turbulência que se sobrepuseram à estratificação da densidade, apresentando um regime dinâmico forçado pela maré, *sensus* Geyer *et al* (2000).

A série de dados hidrográficos referentes ao perfil P106-P115 realizado no final da enchente no dia 6/06/1993 sob uma maré viva de $A_{w,IH}\approx 2.6$m e regimes do Mondego de $Q_{r,APC}\approx 23.9 m^3/s$, permitiu enquadrar os domínios marinho entre os $0<ZC_{x,PM,CP}<7.1$km, a zona de mistura entre os $7.1<ZM_{x,PM,CP}<16$km e o domínio fluvial acima dos $ZF_{x,PM,CP}>16$km, *sensus* Kjerjve (1987) (figura 5.3.1. 28 e quadro 5.3.1. 1). A massa de água marinha foi definida por salinidades compreendidas entre os $30\leq S_{x,PM}\leq 33‰$, temperaturas entre os $16.9\leq T_{x,PM}\leq 17$ºC e densidades $21.6\leq \sigma_{t,x,PM}\leq 24 kg/m^3$, que comparativamente com a massa de água referente à maré dinâmica do CP do estuário, definiu uma água mais densa e mais fria.

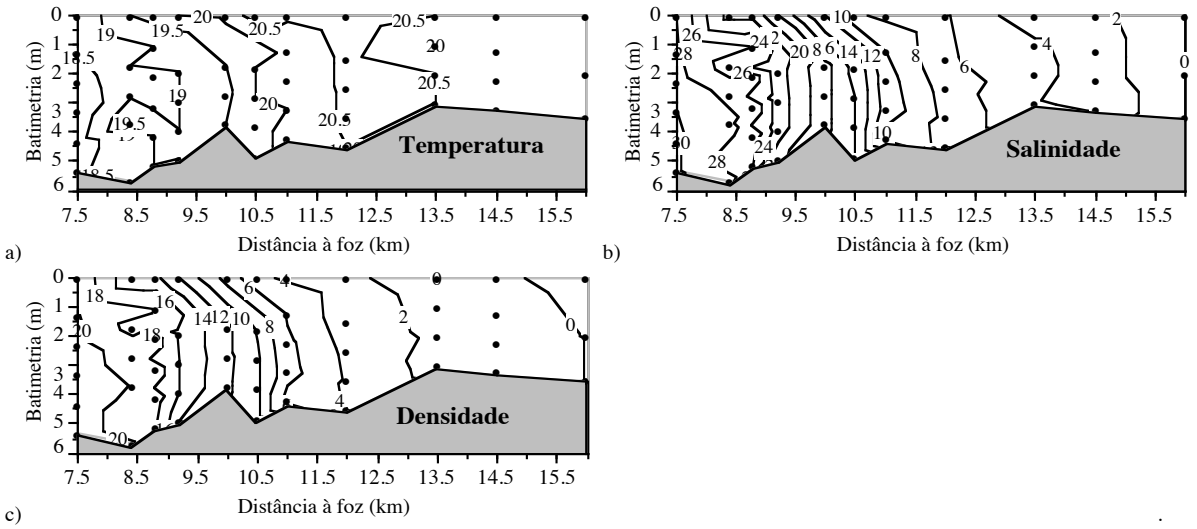


Figura 5.3.1. 28. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 6/06/1993 (referência P106-P115), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, b) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e c) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas $2 kg/m^3$. A zona de mistura definiu um quadro parcialmente misturado com $n_s\approx 0.26$.

A massa de água fluvial, no estuário foi caracterizada por temperaturas que rondaram os $T_{ZF,PM}\approx 20.6$ºC e densidades $\sigma_{\tau,ZF,PM}\approx -1.8 kg/m^3$. A zona de mistura apresentou um desenvolvimento longitudinal da ordem dos 8.9km e foi caracterizada por variações longitudinais de $17.5\leq T_{x,PM}\leq 17.8$ºC, por $10\leq S_{x,PM}\leq 28.7‰$ e por $6.3\leq \sigma_{t,x,PM}\leq 20.6 kg/m^3$ que descreveram gradientes

longitudinais médios junto ao fundo da ordem dos $(\partial T/\partial z)_{x,PM}\approx 0.2ºC/km$, $(\partial S/\partial z)_{x,PM}\approx 3.6‰/km$ e $(\partial \sigma_t/\partial z)_{x,PM}\approx 2.8 kgm^{-3}/km$. Os gradientes máximos registados na coluna de água na ZM foram da ordem dos $(\partial T/\partial z)_{z,b,PM}\approx 0.2ºC/m$, $(\partial S/\partial z)_{z,b,PM}\approx 1.8‰/m$ e $(\partial \sigma_t/\partial z)_{z,b,PM}\approx 1.4 kgm^{-3}/m$ no perfil Bn15, distante 10km da foz. Os 10 perfis verticais que definiram a zona de mistura descreveram um quadro parcialmente misturado com $n_{s,ZM,P106\text{-}P115}\approx 0.26$, *sensus* Unesco (1992).

A variação das isopícnicas (ou das isohalinas) na ZM descreveram um regime do tipo parcialmente misturado para este quadro de marés vivas e baixas descargas fluviais, de acordo com Geyer *et al* (2000). Entre os perfis P106 (a 7.5km) e o P107 (a 8.4km) constatou-se durante as actividades de campo, que se formou à superfície uma frente entre o domínio ZC e a ZM, de acordo com a figura 5.3.1. 29, em que a massa de água marinha mais límpida empurrava a massa de mistura mais túrbida para montante, ambas com movimentos diferenciais de enchente, *sensus* Mied et al (2000).

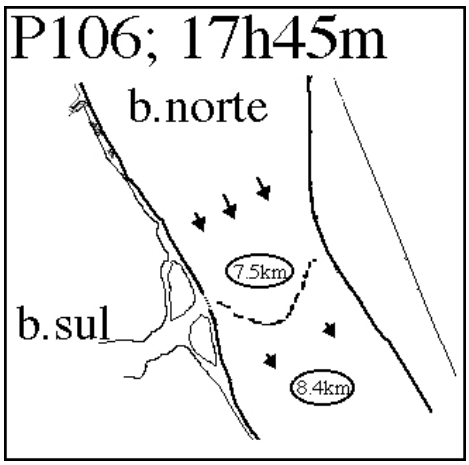


Figura 5.3.1. 29. Frente observada entre os perfis P106 (no Bn12 a 7.5km) e o P107 (Bn13 a 8.4km) que se formou à superfície, pela não mistura entre o domínio ZC e a ZM, em que a massa de água marinha mais límpida empurrava a massa de mistura mais túrbida para montante, ambas com movimentos diferenciais de enchente.

A análise dos perfis de velocidade, de temperatura, de salinidade e de densidade realizados a 16/05/93 no final da enchente ao longo do CP sob a referência P78-P90 (figura 5.3.1. 31) permitiram posicionar o ponto nulo e o alcance máximo da salinidade $R_{ZM,PM,CP,PL}$ respectivamente aos 10km e a 11km da foz. Para as condições hidrodinâmicas amostradas definidas por $A_{w,IH}=1.4m$ e $Q_{r,APC}=43.6m^3/s$, permitiram enquadrar o domínio marinho entre os $0<ZC_{PM,CP}<4.5km$, a zona de

mistura entre os $4.5<ZM_{PM,CP}<11$km e o domínio fluvial acima dos $ZF_{PM,CP}>11$km, de acordo com Fairbridge *in* Brown *et al* (1989) (quadro 5.3.1. 1). No primeiro domínio foi possível identificar na coluna de água duas massas de água distintas, uma superficial de mistura, com isopícnicas praticamente horizontais representativas de estratificação que ocupou os dois primeiros metros. Foi definida por temperaturas compreendidas entre os $17.5\leq T_{x,PM}\leq 17.8$ºC, por $10\leq S_{x,PM}\leq 28.7$‰ e por $6.3\leq \sigma_{t,x,PM}\leq 20.6$kg/m^3, descrevendo gradientes médios verticais da ordem dos $(\partial T/\partial z)_{z,PM}\approx 0.2$ºC/m, $(\partial S/\partial z)_{z,PM}\approx 11$‰/m e $(\partial \sigma_t/\partial z)_{z,PM}\approx 8.5$kgm^{-3}/m no perfil Bn5, distante 2.4km da foz. Na restante parte da coluna de água este domínio, definiu uma massa de água muito homogénea, mais densa com salinidades compreendidas entre os $30\leq S_z\leq 33.5$‰, com $21.6\leq \sigma_{t,z}\leq 24.4$kg/m^3 e temperaturas um pouco mais baixas compreendidas entre os $17.2\leq T_z\leq 17.5$ºC. A elevada concentração de isopícnicas sub-horizontais daquela estreita massa de água superficial reflectiram para além de uma considerável estratificação vertical, definiram um gradiente longitudinal baroclínico de pressão nulo de uma fracção da massa de água de mistura que foi empurrada para cima da massa de água marinha com a entrada da maré, como se comprova com a sucessão de frentes que se formaram e que se encontram representadas na figura 5.3.1. 30. Este gradiente de densidade formado apenas durante a fase da enchente, associado a variações de salinidade, e localizado nos dois primeiros metros superficiais dos escoamentos, reflectiu uma forte turbulência causada pelos processos de mistura gerados aquando da entrada da massa de água marinha mais densa (ZC), sob a massa de água da imediatamente a montante que define a Zona de Mistura (ZM) formando-se a frente representada no esquema a) da figura 5.3.1. 30, frente esta, que foi propagando para montante ao longo do canal da embocadura e do braço norte, tal como registado por Uncles *et al* (1999) no estuário do rio Tweed.

A zona de mistura (ZM) apresentou um desenvolvimento longitudinal da ordem dos 6.5km, definida por gradientes médios longitudinais junto ao fundo de $(\partial T/\partial x)_b\approx 0.1$ºC/km, de $(\partial S/\partial x)_b\approx 5.7$‰/km e de $(\partial \sigma_t/\partial x)_b\approx 4.4$kgm^{-3}/km, muito embora a maior variação longitudinal da

densidade tenha tido lugar nos primeiros 5.5km, com $(\Delta\sigma_t)_{b,4.5\text{-}10km} \approx 23.9 kgm^{-3}$ ostentando os restantes 1000m uma variação longitudinal de apenas $(\Delta\sigma_t)_{b,10\text{-}11km} \approx 0.1\ kgm^{-3}$.

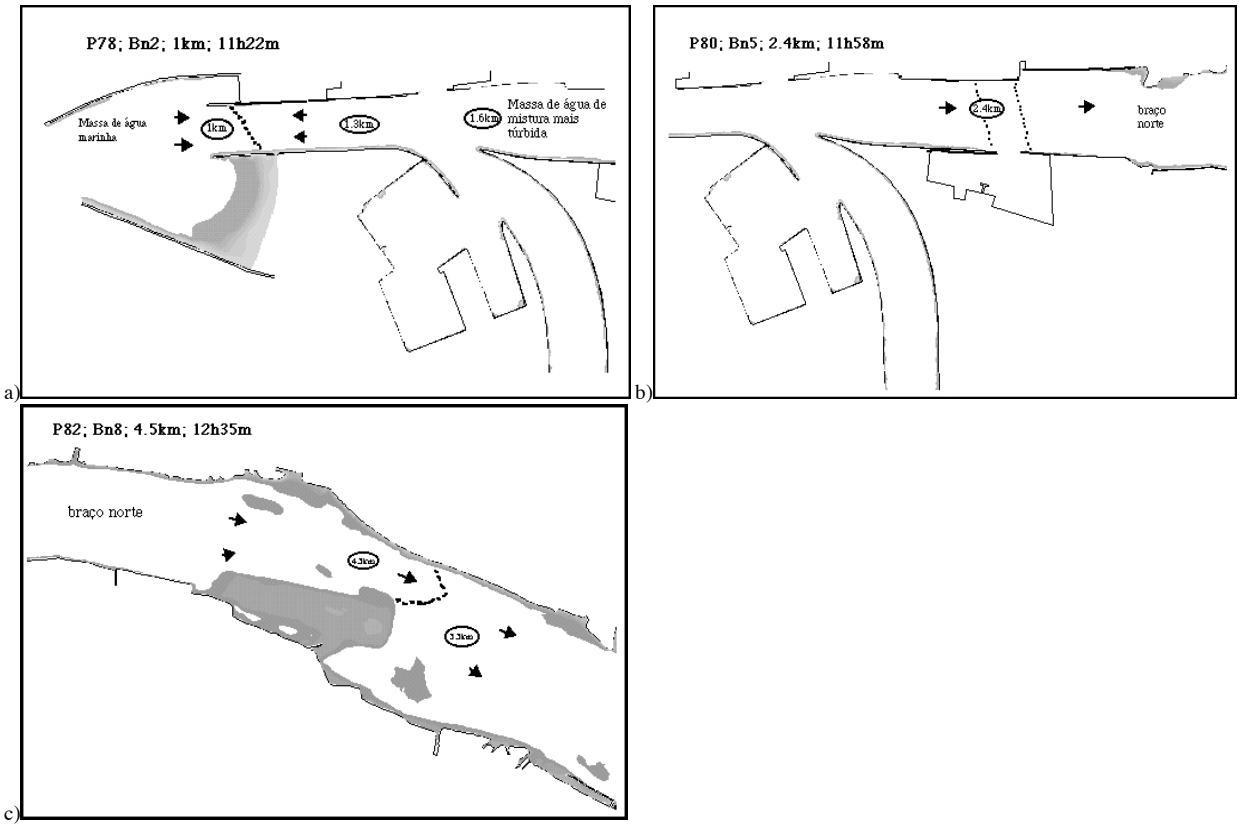


Figura 5.3.1. 30. Frente resultante da confluência da massa de água marinha mais límpida de enchente, com uma massa de água de mistura que se apresentava mais túrbida confinada aos 2 primeiros metros da superfície que se movimentava em sentido de vazante. Esta frente dinâmica encontrava-se localizada entre a estação Bn2 e a Bn3 (perfis P78 e P79) entre os 1km e 1.3km da foz e deslocou-se para montante ao longo do canal da embocadura com o desenrolar da fase da enchente. No esquema b) representaram-se duas frentes localizadas frente ao Cais Comercial. Entre os perfis Bn8 e Bn10 (perfis verticais P82 e P83) registou-se uma frente entre os 4.5km e os 6.3km da foz, resultante da convergência dos escoamentos de enchente.

Esta aglomeração das isopícnicas e respectiva inclinação para montante reflectiu segundo Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Miranda *et al* (2002) quer uma forte mistura turbulenta entre as massas de água marinha e fluvial, quer um movimento da água salgada em direcção à cabeça do estuário. Para este quadro de maré morta sob regimes moderados do Mondego, a análise da distribuição das isohalinas (ou das isotáquias) na zona de mistura apontou para um regime parcialmente misturado que também foi corroborado pela magnitude média do parâmetro $n_{s,P78\text{-}P90} \approx 0.97$ obtida para os cinco perfis verticais da ZM. De acordo com Unesco (1992) a magnitude deste parâmetro terá representado um quadro muito próximo ao de transição para uma mistura e

estratificação de cunha salina (definido apartir de n_s>1). Esta proximidade para um quadro do tipo I, também foi corroborado quer com o registo em dois destes perfis de magnitudes de $n_{s,P84}$≈1.5 e $n_{s,P86}$≈1.6, quer com um número de Richardson médio obtido para a ZM de $R_{i,P78\text{-}P90}$≈1.14, que apontou condições de turbulência capazes de gerar alguma mistura vertical, definindo uma estratificação considerável *sensus* Dyer (1989) e Geyer *et al* (2000) de uma dinâmica do canal principal em muito regulada pelas descargas do Mondego.

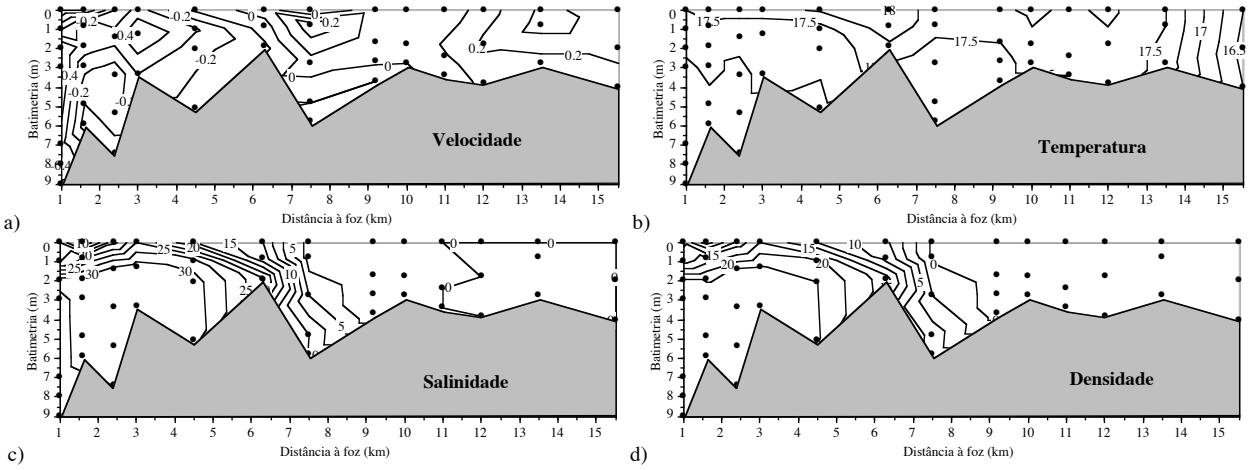


Figura 5.3.1. 31. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 16/05/1993 (ref.P78-P90), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) da velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) da temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.25ºC, c) da salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) e sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. Descreveu um regime de mistura e estratificação de transição do tipo II para o I, com $n_{s,P78\text{-}P90}$≈0.97 e $R_{i,P78\text{-}P90}$≈1.14.

A montante desta zona do canal principal, identificou-se uma massa de água doce sujeita à maré dinâmica, que apresentou temperaturas e densidades muito homogéneas compreendidas entre os $16.5 \leq T_z \leq 17.5$°C e os $-1.1 < \sigma_{t,x} < -1.3$kg/m^3, definidas por gradientes verticais de apenas $(\partial T/\partial z)_b$≈0.03ºC/km e $(\partial \sigma_t/\partial z)_b$≈0.01kgm^{-3}/km e longitudinais de $(\partial T/\partial x)_b$≈0.2ºC/km e $(\partial \sigma_t/\partial x)_b$≈0.04kgm^{-3}/km (figura 5.3.1. 31). Esta foi designada de massa de água fluvial e definiu o domínio fluvial *sensus* Kjerjve (1987) e Fairbridge *in* Brown *et al* (1989). Na zona de mistura, a água apresentou uma temperatura relativa superior aos domínios ZC e ZF relacionada com a insolação nestes ambientes muito pouco profundos.

O perfil referência P91-P105 realizado no final da vazante subsequente ao perfil referência P78-P90, posicionou os limites dos diferentes domínios entre os $0 < ZM_{BM,CP} < 9.2$km e os

$ZF_{BM,CP}$>9.2km (figura 5.3.1. 32 e quadro 5.3.1. 1). As isopícnicas na Zona de Mistura apresentaram-se muito condensadas entre si. Na parte posterior e junto à superfície apresentaram-se um pouco mais espaçadas, contorcidas e inclinadas para montante denotando um gradiente baroclínico no sentido da cabeça do estuário, e também porque corresponderam a uma zona de forte mistura turbulenta entre as fluvial e as de mistura, em concordância com Mied *et al* (2000).

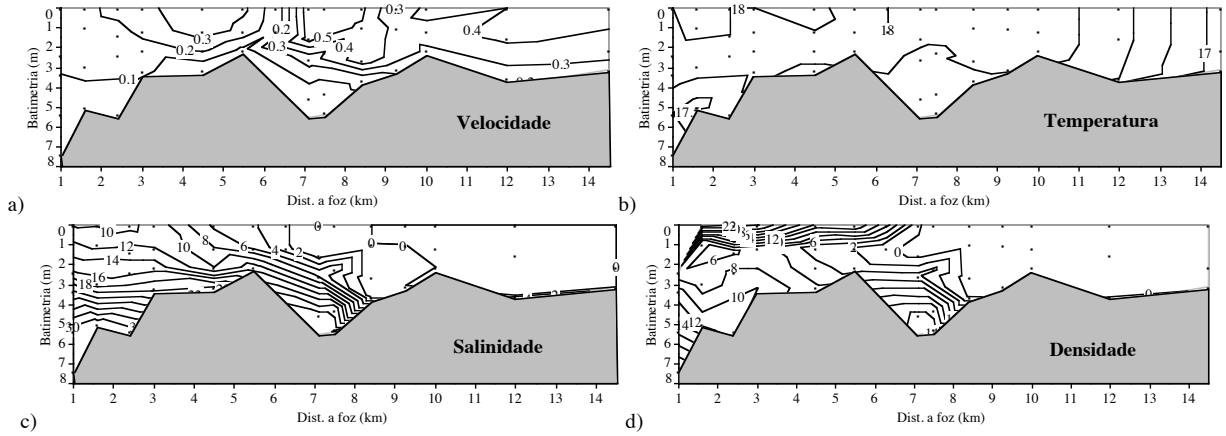


Figura 5.3.1. 32. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da vazante em 16/05/1993 (referência P91-P105), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. Definiu um quadro de mistura muito pequena e elevada estratificação com $n_{s,P91-P105}$≈1.52 e $R_{i,P91-P105}$≈2.68.

Na restante parte da coluna de água, as isopícnicas da ZM apresentaram-se praticamente horizontais, encontrando-se longitudinalmente interrompidas, mas não perturbadas pela topografia do fundo ao quilómetro 6.3 (o que não acontece com a variação longitudinal da velocidade). Desta forma, reflectiram uma maior estratificação deste sector da ZM e uma menor turbulência, de acordo com Darbyshire & West (1992). A ZM foi igualmente definida por gradientes verticais médios elevados, da ordem dos $(\partial T/\partial z)$≈0.1ºC/m, dos $(\partial S/\partial z)$≈4.3‰/m e dos $(\partial \sigma_t/\partial z)$≈3.3kgm^{-3}/m, e por gradientes longitudinais médios junto ao fundo da ordem dos $(\partial T/\partial x)_b$≈0.03ºC/km, de $(\partial S/\partial x)_b$≈4.6‰/km e de $(\partial \sigma_t/\partial x)_b$≈3.5kgm^{-3}/km. Nesta fase final da vazante a zona de mistura foi caracterizada por uma mistura e uma estratificação definida por $n_{s,P91-P105}$≈1.52 e $R_{i,P91-P105}$≈2.68.

Entre as leituras dos perfis verticais P104 e P105 realizados respectivamente nos pontos de amostragem Bn2 e no Bs1, posicionados no sector proximal da embocadura e no sector mais distal do braço sul, a 1km e a 1.7km da foz, registou-se uma frente de superfície que se encontra representada no esquema a) da figura 5.3.1. 33. Esta traduziu um desvio de parte dos escoamentos margem esquerda do canal principal em movimento de vazante para o sector mais distal do braço sul. A entrada parcial da massa de água de mistura do CP para o sector mais distal do braço sul ocupou apenas os dois primeiros metros superficiais, escoando na parte mais profunda, a massa de água de mistura proveniente do braço sul.

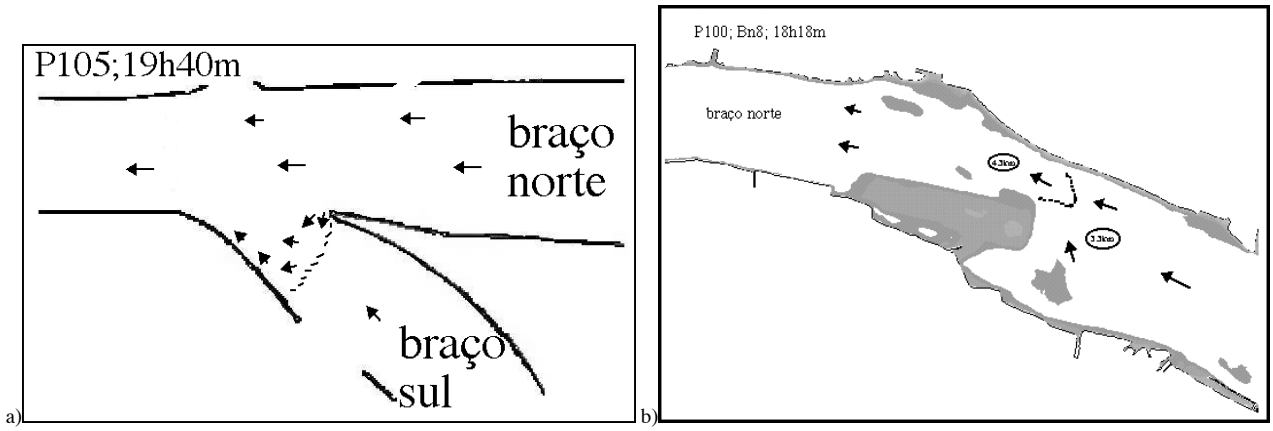


Figura 5.3.1. 33. Frentes registadas aquando da realização do perfil longitudinal P91-P105 realizado no final da vazante, sob as condições hidrodinâmicas de $A_{w,IH}$=1.4m e de $Q_{r,APC}$=43.6m^3/s. No esquema a) representa-se a frente formada entre pontos de amostragem Bn2 e o Bs1 (P104 e P105), localizados a 1km e a 1.7km da foz, no sector proximal da embocadura e no sector mais distal do braço sul. Parte da massa de água proveniente do braço norte entrava parcialmente para o sector distal do braço sul. No esquema b) ilustra-se uma frente que se formou entre os perfis P99 e P100 localizados em Bn9 e Bn8, a 5.5km e a 4.5km, associada à convergência dos escoamentos de vazante pelo estreitamento da secção molhada do braço norte.

Entre os perfis verticais Bn9 e Bn8 (P99 e P100) localizados a 5.5km e a 4.5km, registou-se um frente resultante da convergência dos escoamentos de vazante pelo estreitamento da secção molhada do braço norte em consequência da barra intermareal localizada na altura na margem esquerda, frente à Metálica da Fontela, como se ilustra no esquema b) da figura 5.3.1. 33.

O perfil longitudinal referência P155-P164, realizado no dia 1/12/1993 sob uma maré viva de $A_{w,IH}\approx$2.4m e descargas médias do Mondego da ordem dos $Q_{r,APC}\approx$91m^3/s permitiu enquadrar os três domínios definidos por Kjerjve (1987) para o final da enchente, nos seguintes limites espaciais: entre os $0<ZC_{x,PM,CP}<5$km para o domínio marinho, entre os $5<ZM_{x,PM,CP}<9.2$km para a zona de

mistura, e acima dos $ZF_{x,PM,CP}$>9.2km para o domínio fluvial (quadro 5.3.1. 1 e figura 5.3.1. 35). A massa de água marinha que ocupou o sector distal do CP, apresentou variações de salinidade da ordem dos $30 \leq S_{x,PM,CP} \leq 34.5‰$, temperaturas de $14.3 \leq T_{x,PM,CP} \leq 14.7ºC$ e densidades de $22.7 < \sigma_{t,x,PM,CP} < 25.7 kg/m^3$. A ZC_{CP} do estuário, apresentou nos dois primeiros metros da parte superficial uma massa de água de mistura, menos salina, ligeiramente mais fria e menos densa que conferiu uma circulação estuarina clássica *sensus* Miranda *et al* (2002).

Este contexto foi corroborado com o registo de uma frente na superfície localizada entre os perfis P155 (Bn2, a 1km) e o P156 (Bn3, a 1.3km) (conforme figura 5.3.1. 34.a), que representou uma área de forte turbulência em resultado da massa de água marinha em movimento de enchente começar a empurrar a massa de água de mistura para montante que ainda se apresentava em movimento de vazante, de acordo com Uncles *et al* (1999) e com Mied *et al* (2000).

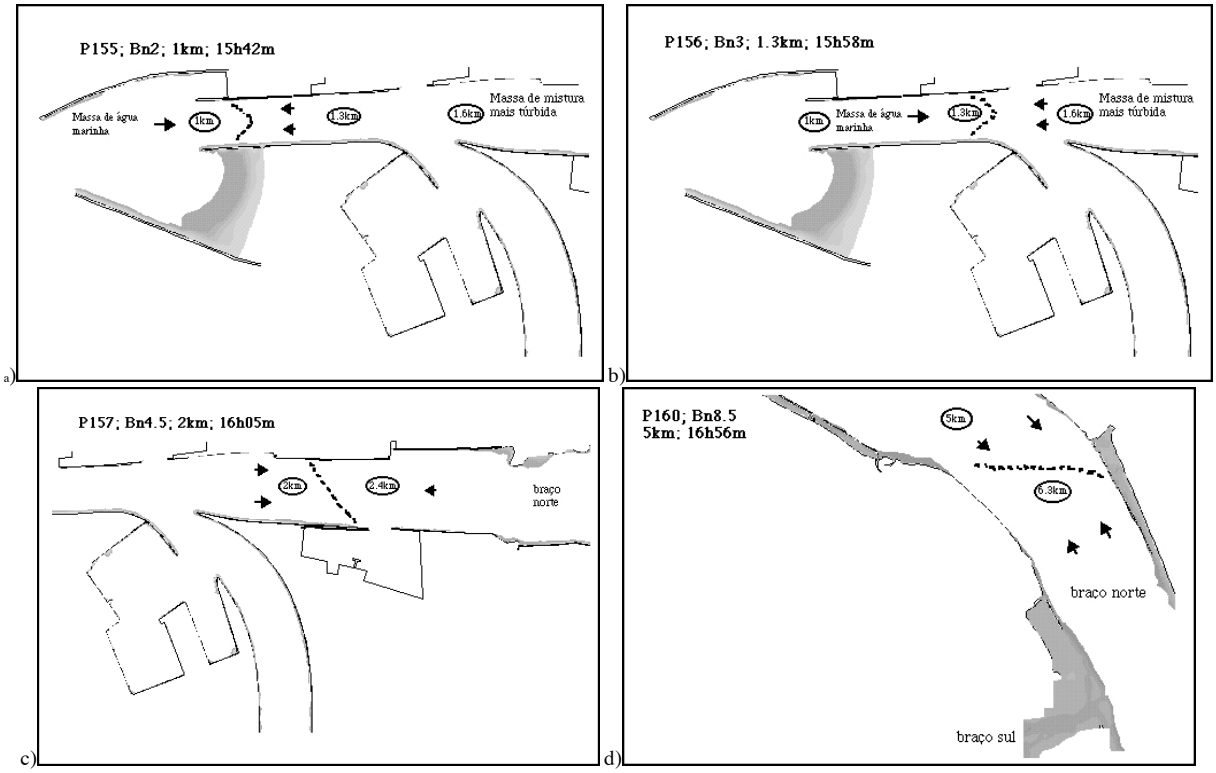


Figura 5.3.1. 34. Frente que se formou pela não mistura ocorrida entre a massa de água marinha em movimento de enchente que empurrava para montante a massa de água de mistura que ainda se apresentava em movimento de vazante. Esta frente às 15h42m encontrava-se localizada entre os perfis p155 (Bn2, a 1km) e o p156 (Bn3, a 1.3km) de acordo com o gráfico a), progredindo para montante. A forma em ">" desta frente no sector distal do CP relacionou-se com a confluência dos escoamentos de vazante provenientes dos braços norte e sul. Com a propagação desta frente para montante, ao longo do braço norte, ela passou a apresentar a forma "\" em resultado de uma maior propagação da enchente pelo sector sul deste canal. No sector proximal do braço norte, esta frente passou a ostentar a forma em "/" em resposta à morfologia encurvada do CP que passou a canalizar a maré para a margem direita.

A forma em ">" desta frente neste sector do estuário, relacionou-se com o facto de corresponder a um local de confluência dos escoamentos de vazante provenientes dos braços norte e sul (esquemas a) e b) da figura 5.3.1. 34).

Ao longo do sector distal braço norte, esta frente passou a apresentar a forma "\" em resultado de a maré se propagar com maior intensidade na margem esquerda do CP, de acordo com a representação esquemática c) da figura 5.3.1. 34.

No sector proximal do braço norte, esta frente passou a ostentar a forma em "/" em resposta à morfologia encurvada do CP que passou a canalizar preferencialmente a entrada da maré para a margem direita, conforme se ilustra no esquema d) da figura 5.3.1. 34.

A ZM estendeu-se longitudinalmente apenas por 4.2km, descrevendo uma forte zona de mistura turbulenta com isopícnicas muito condensadas, de traçado irregular e inclinadas para montante, à semelhança do considerado por Darbyshire & West (1992). Foi definida por gradientes verticais médios elevados, que foram da ordem dos $(\partial T/\partial z)\approx 0.14ºC/m$, dos $(\partial S/\partial z)\approx 3.5‰/m$ e dos $(\partial \sigma_t/\partial z)\approx 2.7 kgm^{-3}/m$, no perfil Bn10, a 10km da foz. Os gradientes longitudinais médios junto ao fundo, foram elevados, da ordem dos $(\partial T/\partial x)_b\approx 0.35ºC/km$, dos $(\partial S/\partial x)_b\approx 7.8‰/km$ e dos $(\partial \sigma_t/\partial x)_b\approx 6.0 kgm^{-3}/km$. A análise da distribuição espacial das isopícnicas e das isotáquias quando conciliada com as magnitudes médias do parâmetro de estratificação e do número de Richardson dos cinco perfis que compuseram a zona de mistura com $n_{s,P155\text{-}P164}\approx 2.9$ e $R_{i,P155\text{-}P164}\approx 2.1$, descreveram uma mistura e estratificação do tipo cunha salina *sensus* Unesco (1992). Definiram condições de turbulência insuficientes para gerar mistura vertical, verificando-se uma estratificação elevada, estável e uma hidrodinâmica dominada pelas descargas fluviais. Na zona de interface entre as duas massas de água, terá ocorrido um arrastamento de água mais densa para a massa de água de superfície, à semelhança do descrito por Chant & Wilson (2000) para sistemas costeiros semelhantes. O domínio fluvial foi definido por uma massa de água doce, com temperatura que

rondou os $T_x \approx 12.8ºC$, com densidade de $\sigma_{t,x} \approx -0.6 kg/m^3$, condicionada apenas pela maré dinâmica. Comparativamente com a marinha, para além de menos densa apresentou-se mais fria e mais túrbidas.

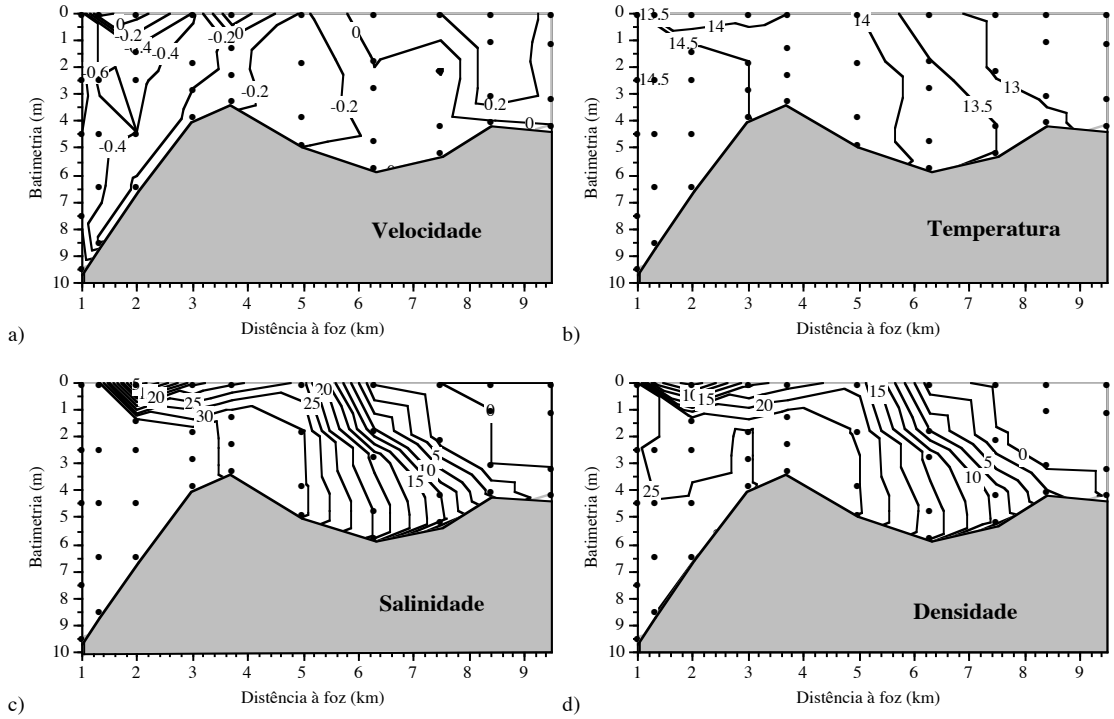


Figura 5.3.1. 35. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 1/12/1993 (referência P155-P164), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.2m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. Descreveu nesta fase final da vazante um quadro de mistura vertical e estratificação do tipo cunha salina com $n_{s,P155-P164} \approx 2.9$ e $R_{i,P155-P164} \approx 2.1$.

No final da vazante do anterior ciclo de maré (de 1/12/93) foi realizado um perfil longitudinal ao canal principal sob a designação P150-P154. A análise dos gráficos da figura 5.3.1. 36 permitiu posicionar o limite superior da zona de mistura por volta dos $R_{ZM,BM,CP} \approx 3.5km$ no sector distal do estuário, com um desenvolvimento longitudinal de $L_{ZM,BM,CP} \approx 3.5km$, prolongando-se todavia muito para além das extremidades dos molhes externos da embocadura, para a zona costeira, sob a forma de uma pluma túrbida[7] superficial. Na $ZM_{BM,CP}$, junto à superfície foram registadas salinidades da ordem dos 0.5‰ e inferior a 2‰ nos dois primeiros metros, muito embora as descargas fluviais consideráveis do Mondego de $Q_{r,APC} \approx 91 m^3/s$. No perfil vertical P154, na Bn6 (1.6km), a massa de água mesmo junto ao fundo apresentou salinidades da ordem dos 24‰ e um

[7]. Observações locais efectuadas apartir da extremidade do molhe sul da embocadura.

ligeiro movimento de enchente ($u_b \leq$|-0.15|m/s). De acordo com Darbyshire & West (1992), estes resultados indiciaram ter havido uma forte mistura turbulenta entre a massa de água fluvial e a da ZM (Figura 5.3.1. 36). Esta fase final da vazante descreveu uma mistura vertical e uma estratificação muito pequenas do tipo cunha salina com $n_{s,P150\text{-}P154} \approx 2.9$ e $R_{i,P150\text{-}P154} \approx 0.88$ (quadro 5.3.1. 1).

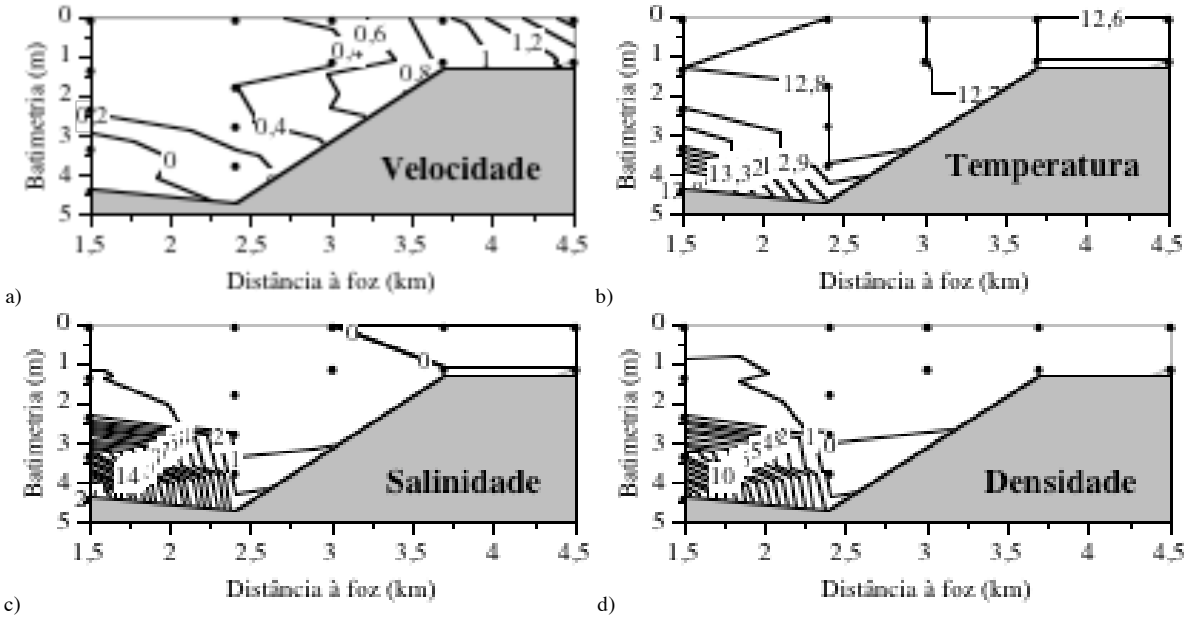


Figura 5.3.1. 36. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 1/12/1993 (referência P150-P154), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.2m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.1ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. Descreveu nesta fase final da vazante um quadro de mistura vertical e estratificação do tipo cunha salina com $n_{s,P150\text{-}P154} \approx 2.9$ e $R_{i,P150\text{-}P154} \approx 0.88$.

Junto ao perfil P154, no ponto de amostragem Bn4, a 1.6km da foz, registou-se uma frente que resultou da não mistura entre a massa de água de mistura proveniente do canal principal com a massa de água de mistura proveniente do braço sul, ambas com movimentos de vazante. Esta frente posicionou-se no sector mais distal do braço sul e resultou do desvio da massa de água em circulação junto à margem esquerda do CP para o braço sul, retornando novamente ao CP na zona de confluência dos dois braços.

Sob uma maré morta de $A_{w,IH}$=1.2m e descargas elevadas do Mondego da ordem dos $Q_{r,APC}$=103.4m^3/s, foi realizado um perfil longitudinal ao CP de parâmetros físicos no dia 22/12/93 com a designação de campo P170-P175 (figura 5.3.1. 38). Da análise destes perfis verificou-se que

os domínios definidos por Kjerjve (1987) enquadraram-se entre os $0<ZC_{x,PM,CP}<2.8$km, entre os $2.8<ZM_{x,PM,CP}<6.5$km para a zona de mistura e acima dos $ZF_{x,PM,CP}>6.5$km para o domínio fluvial (quadro 5.3.1. 1).

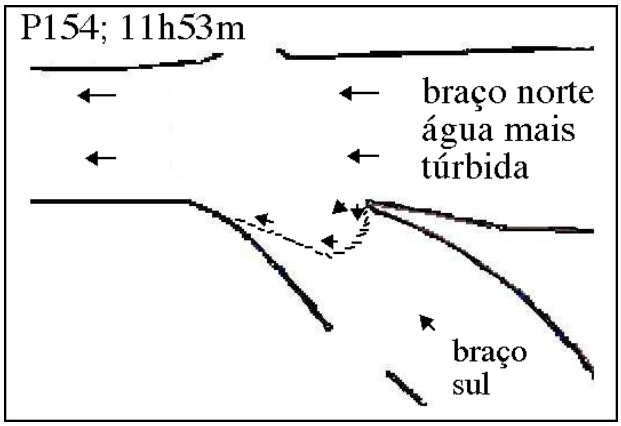


Figura 5.3.1. 37. Frente que se formou no sector distal do braço sul, entre as massas de água de mistura provenientes do canal principal e do braço sul durante as fase de vazante.

O domínio marinho foi composto por uma massa de água marinha que se restringiu praticamente à metade inferior do escoamento e que apresentava um movimento de enchente, enquanto na metade superior, por uma massa de água de mistura que se movimentava em sentido de vazante, definindo desta forma uma circulação estuarina clássica (Pritchard, 1989 *in* Miranda *et al*, 2002). A primeira, foi caracterizada por variações de salinidade no sector distal do estuário compreendidas entre os $30\leq S_{x,PM,CP}\leq 33‰$, de temperatura entre os $13.6\leq T_{x,PM,CP}\leq 13.7$ºC e de densidade apenas entre os $24.4\leq\sigma_{t,x,PM,CP}\leq 24.7$kg/m^3. A massa de água de mistura que ocupou os 2m superficiais, foi caracterizada por isopícnicas muito chegadas entre si e quase sub-horizontais, representativas de uma elevada estratificação e de uma componente longitudinal do gradiente baroclínico praticamente nula. Exibiu gradientes verticais de $(\partial T/\partial z)\approx 1$ºC/m, de $(\partial S/\partial z)\approx 12.6‰$/m e de $(\partial\sigma_t/\partial z)\approx 9.5$kgm^{-3}/m no perfil Bn3 (p170), a 1.3km da foz. Representou uma massa de água que escoou sobre a massa de água marinha com um movimento contrário, gerado por um gradiente da superfície livre (barotrópico) por parte do Mondego. A zona de mistura apresentou uma extensão longitudinal de apenas 3.7km, tendo sido demarcada pelo alcance das isohalinas de $S_{x,PM,CP}=0‰$ e de $S_{x,PM,CP}\approx 30‰$ (entre as isopícnicas de $-0.4\leq\sigma_{t,x,PM,CP}\leq 21.8$kgm^{-3}/m). Da análise dos diagramas

longitudinais da variação da velocidade e da salinidade, foi possível diferenciar que nos dois metros superficiais da ZM e na sua parte mais posterior (zona de contacto com a massa de água fluvial, compreendida sensivelmente entre as isohalinas de $S_{PM,CP}\approx 0‰$ e de $S_{PM,CP}\approx 5‰$), apresentava um movimento de vazante. A restante parte da ZM, mais próxima do fundo, deslocava-se em sentido de enchente. A zona de mistura também foi caracterizada por gradientes elevados de salinidade (ou densidade), quer longitudinalmente, quer na coluna de água, que foram junto ao fundo da ordem dos $(\partial T/\partial x)_b\approx 0.4ºC/km$, de $(\partial S/\partial x)_b\approx 8‰/km$ e de $(\partial \sigma_t/\partial x)_b\approx 6.1 kgm^{-3}/km$, e na coluna de água de $(\partial T/\partial z)\approx 0.7ºC/m$, dos $(\partial S/\partial z)\approx 9.1‰/m$ e dos $(\partial \sigma_t/\partial z)\approx 7 kgm^{-3}/m$, no perfil p171 (em Bn6), disto 3km da foz. A zona de interface entre as massas de água marinha de fundo e a de superfície com sentidos de propagação opostos, correspondeu a uma zona de movimento nulo, tal como identificado por Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002). À superfície com um movimento de vazante foi identificada uma fracção da massa de água de mistura e não a massa de água fluvial, com $S\approx 0‰$. Os movimentos opostos àquelas massas de água resultam de gradientes barotrópicos gerados pelos desníveis da superfície livre, quer do Mondego, quer pela maré oceânica. A análise da distribuição horizontal e vertical da densidade dos fluidos, apontou para um quadro muito estratificado definido por uma cunha salina de fundo com origem marinha, definindo uma mistura vertical muito fraca (mistura e estratificação do tipo I *sensus* Fairbridge *in* Brown *et al* (1989). O parâmetro de estratificação e o número de Richardson médios determinados para a zona de mistura neste perfil longitudinal ao CP com magnitudes de $n_{s,P170\text{-}P175}\approx 3.3$ e de $R_{i,P170\text{-}P175}\approx 1.8$ corroborou aquele quadro de mistura. O facto de a camada superior à cunha salina, em movimento de vazante, ter correspondido a uma água de mistura e não uma camada de água fluvial com $S_{x,ZM}=0‰$, levou a considerar de acordo com Chant & Wilson (2000), que na interface entre estas duas camadas de densidades muito distintas gerou-se um forte cizalhamento e consequentemente uma mistura turbulenta, resultante do movimento diferencial das duas massas de água, que devido aos processos de arrastamento deslocaram água marinha para a parte superior dos escoamentos, criando nesta um

gradiente longitudinal de salinidade em direcção à foz e gradientes verticais de densidade elevados. O referido autor também considera que nestes quadros de mistura terá ocorrido um permanente ajuste hidrodinâmico entre a quantidade de água que se move na cunha salina do estuário acima com a quantidade de água fluvial superficial que escoa para o mar, de acordo com o princípio de conservação de massa. Também relaciona as pequenas oscilações longitudinais sofridas pela cunha salina com as variações da amplitude da maré e com a magnitude dos caudais fluviais. De acordo com Darbyshire & West (1992), Chant & Wilson (2000) este quadro ocorreu sob regimes hidrodinâmicos dominados pelos caudais fluviais que em parceria com os processos de arrastamento, desempenham um papel primordial nos processos de mistura, enquanto a difusão turbulenta terá sido praticamente insignificante. O domínio fluvial deste perfil longitudinal foi definido por uma massa de água doce, que comparativamente à massa de água marinha apresentou-se um pouco mais fria (com $T_{x,ZF,PM,CP} \approx 11.5ºC$) e menos densa (com $\sigma_{t,x,ZF,PM,CP} \approx -0.4 kgm^{-3}$).

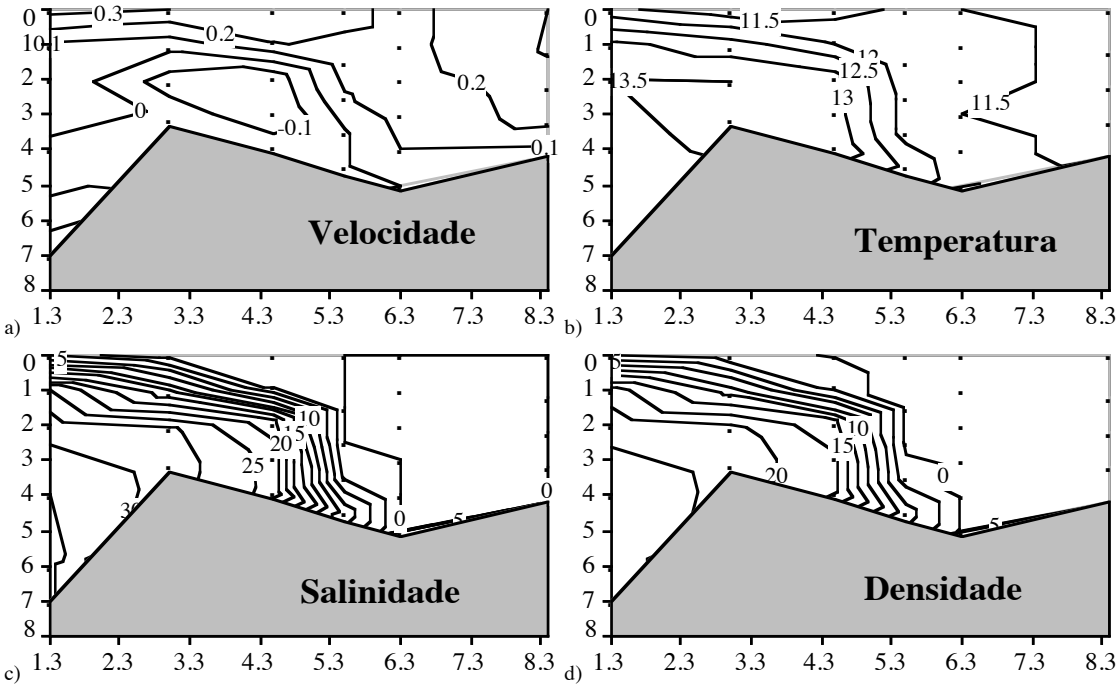


Figura 5.3.1. 38. Perfil longitudinal realizado ao longo do canal principal no final da enchente em 22/12/1993 (referência P170-P175), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. A média dos parâmetros de $n_{s,P170-P175} \approx 3.3$ e de $R_{i,P170-P175} \approx 1.8$ determinou um quadro muito estratificado definido por uma mistura vertical muito pequena (tipo I).

Quando analisados todos os perfis longitudinais dos parâmetros físicos em análise realizados no braço sul verificou-se que ocorreram dois padrões distintos na variação longitudinal e vertical da salinidade (ou da densidade), pelo que se escolheram apenas dois exemplos mais representativos dos mesmos. O primeiro exemplo correspondeu ao perfil longitudinal efectuado em 8/12/91 com a referência P6-P21, expresso na figura 5.3.1. 40, que decorreu sob uma maré viva de $A_{w,IH}\approx 2.2m$ e $Q_{r,APC}\approx 15m^3/s$, que de acordo com Baptista *et al* (1995) terá correspondido a uma descarga média do rio Pranto de $Q_{r,Pranto,APC}\approx 1.5m^3/s$. Este perfil longitudinal teve início na estação da Embocadura[8], abrangeu toda a extensão longitudinal do braço sul e terminou na estação dos Cinco Irmãos[9], que à semelhança da primeira se localizava no canal principal. A estação da Gala situou-se a uma distância relativa da foz de 3km. Da análise dos quatro perfis longitudinais que compõem a figura 5.3.1. 40 tornou-se possível verificar que as magnitudes das isotáquias de maior magnitude assinaladas no canal principal, na Embocadura durante a enchente, foram da ordem dos -0.8m/s, e que estas forma muito superiores às magnitudes medidas em todo o braço sul, que atingiram ordens dos -0.3m/s no seu sector distal. Estes resultados corroboraram as diferenças hidrodinâmicas consideráveis já assinaladas entre estes dois canais, reconhecendo um carácter mais dinâmico ao CP e um regime de correntes de menor magnitude para o braço sul, de origem mareal, que são relacionadas com o carácter periférico deste braço relativamente à entrada da maré e à circulação das descargas fluviais do Mondego que se realizam pelo canal principal do estuário. Neste perfil, também foi possível diferenciar na estação da Embocadura uma massa de água marinha de fundo em movimento de enchente, e uma massa de água de mistura de superfície, menos densa, com um movimento de vazante. Esta última, ostentou uma espessura da ordem de 1m, e na altura da leitura destes parâmetros físicos na referida estação, encontrava-se confinada à parte central do canal, de acordo com o esquema a) da figura 5.3.1. 39. A não mistura entre estas duas massas de água reflectiu-se à superfície na formação de uma frente que progrediu no sentido de jusante, em

[8]. Que abrangeu a distância longitudinal compreendida entre os 1 e os 1.5km.
[9]. Que representou neste perfil uma parte da secção transversal do CP, entre os 8.6km e os 9.5km.

direcção à foz do estuário, e que gerou temporariamente na zona da estação da Embocadura um quadro de circulação estuarina clássica, semelhante ao representado na figura 5.3.1. 14 (aquando da leitura destes parâmetros nos ciclos de maré na estação da Embocadura). No o braço sul, verificou-se ter havido uma tendência geral de decréscimo da densidade dos escoamentos para montante, interrompida localmente no sector médio deste braço, onde se registou um ligeiro aumento relativo deste parâmetro. Este aumento esteve relacionado com a circulação lateral de massas de água de mistura mais salinas retidas em sectores marginais à circulação principal deste braço, que durante a enchente se processou fundamentalmente pelo sector sul deste canal, contornando a grande barra longitudinal posicionada a montante da ponte da Gala (figura 5.2.1). Esta massa de água retida no braço sul durante a baixa-mar, e que com a entrada da maré foi empurrada e confinada lateralmente para o sector norte dos troços médio-proximal do braço sul, foi delimitada à superfície por uma extensa frente representada no esquema b) da figura 5.3.1. 39. A disposição longitudinal desta frente foi praticamente concordante com a batimetria, contornando lateralmente a parte mais profunda do canal principal submareal e intermareal do braço sul, por onde escoaram os maiores volumes de água (figura 5.2.2). Com a subida da maré, a frente tendeu a dissipar-se, ocorrendo na PM apenas vestígios desta no sector mais proximal deste braço. Sugerindo um incremento dos processos de mistura laterais com a subida da maré. Aquando da realização deste perfil longitudinal, a preia-mar no braço sul teve lugar sensivelmente a meio deste canal, aproximadamente a 6km da foz. As leituras dos parâmetros físicos em análise, localizadas a montante do ponto nulo, passaram a reflectir a fase inicial da vazante para o sector proximal do braço sul, que foi caracterizada pela formação de dois gradientes barotrópicos de sentidos opostos. Um foi responsável pelo movimento da maior parte da massa de água do sector proximal intermareal do braço sul em direcção à Ponte da Gala, enquanto o outro, pelo movimento da restante massa de água de mistura compreendida entre os quilómetros ≈8.2 e os 8.6 em direcção ao braço norte, como se representa no perfil longitudinal de velocidades da figura 5.3.1. 40. Terá

contribuído para este fenómeno, um aumento relativo da amplitude da maré neste sector intermareal do braço sul, relacionado quer com os processos de convergência, quer com um incremento do desfasamento ocorrido entre as duas componentes da maré. Corroborou igualmente, o desfasamento na variação da superfície livre ocorrido entre os dois braços do estuário, que se reflectiu em diferenças de fase da maré e num desnível da superfície livre em direcção ao CP. Este quadro inicial de vazante vigente no sector proximal do braço sul contrastou com o ainda estabelecido no CP, na estação dos Cinco Irmãos, onde os escoamentos de fundo ainda se apresentavam na fase terminal da enchente. Contudo, à superfície na parte central do canal registou-se uma frente com a forma em "<" que se propagava em direcção à foz. Resultava da confluência e da não mistura entre a massa de água marinha em final da enchente com a massa de água de superfície de mistura, menos densa que se movimentava em sentido de vazante e que reflectia o gradiente barotrópico do gradiente longitudinal de pressão relacionado com as descargas do Mondego (esquema b) da figura 5.3.1. 39). Nesta confluência proximal destes dois braços mais importantes do estuário, também se verificou que durante a fase final da enchente e na fase inicial da vazante do sector proximal do braço sul, parte da sua massa de água escoou sempre em direcção ao braço norte.

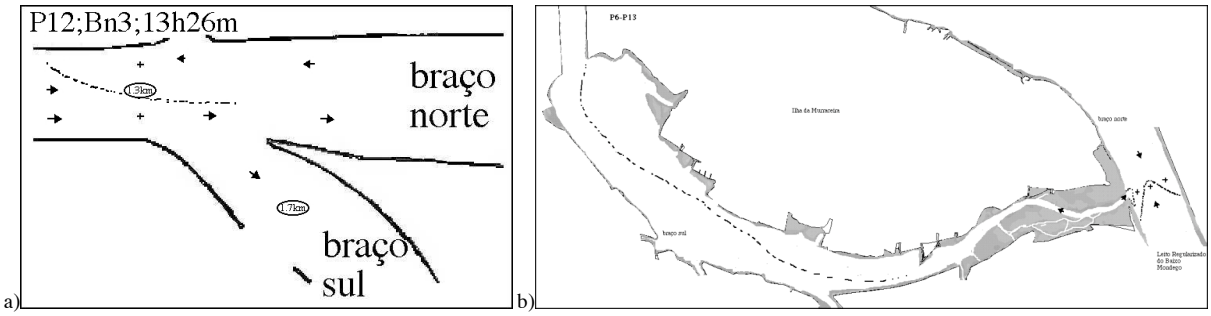


Figura 5.3.1. 39. Frente que foram registadas no sector distal do canal principal, ao longo do braço sul e no sector mais proximal do braço norte durante a execução do perfil longitudinal P6-P21. No esquema a) ilustra-se uma frente que se formou na parte central do canal, na estação da Embocadura, e que resultou da não mistura entre a massa de água marinha em movimento de enchente com a massa de água de mistura, menos densa, proveniente do braço norte em movimento no sentido de vazante. Esta última encontrava-se confinada ao primeiro metro de superfície e aos sectores norte e central do canal, e resultou dos fenómenos de arrastamento sofridos pelos caudais do Mondego ocorridos ao longo do braço norte. No esquema b) representou-se uma extensa frente que se estendeu longitudinalmente no braço sul, separando duas massas de água de mistura. A norte a massa de água que ficou retida aquando da BM precedente e que foi empurrada para montante e para o sector norte deste canal com a entrada da maré. Neste esquema também se apresenta a frente em forma de "<" que foi registada na estação dos Cinco Irmãos e que resultou da confluência entre a massa de água marinha em fase final de enchente com a massa de água de mistura, menos densa que se movimentava em sentido de vazante ao longo do canal principal.

No braço norte, esta massa de água de mistura muito mais túrbida formou uma frente que se localizou junto à margem esquerda, e que foi empurrada para montante durante a enchente no CP (figura 5.3.1. 39.b), e para jusante da estação dos Cinco Irmãos aquando da fase de vazante nesta estação.

Da análise dos diagramas b) c) e d) da figura 5.3.1. 40 constatou-se que neste local do CP, a margem direita deste canal apresentou as salinidades e as densidades relativas de maior magnitude de toda a secção transversal aquando de marés vivas sob descargas do Mondego de baixa magnitude, indiciando que a entrada preferencial da maré se efectuou preferencialmente pelo sector norte deste canal, em resultado da morfologia do braço norte. Estes resultados também reflectiram que os escoamentos na estação dos Cinco Irmãos apresentaram maiores salinidades (ou densidades) relativamente à massa de água de mistura em circulação no sector proximal do braço sul na fase final da enchente, indiciando desta forma uma maior penetração da maré salina pelo CP.

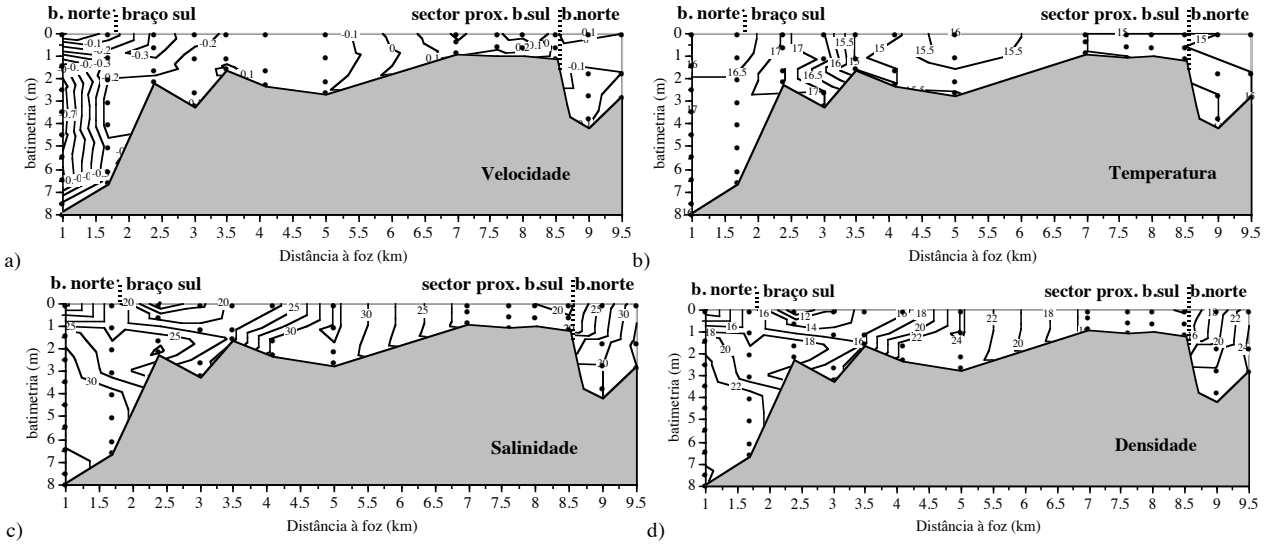


Figura 5.3.1. 40. Perfil longitudinal realizado ao longo do braço sul no final da enchente em 8/12/1991 (referência P6-P21) abrangendo parte das estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos, respectivamente localizadas nas confluências distal e proximal deste braço com o canal principal. Apresentam-se os diagramas longitudinais referentes à medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2.5‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2.5kg/m^3. No braço sul registou-se um quadro bem misturado com $n_{s,BS,ZM,p6-p21}\approx0.03$ e com $R_{i,BS,ZM,p6-p21}\approx0.07$, associando a regime dinâmico forçado pela maré.

A análise da comportamento das isohalinas na coluna de água nas duas estações anteriores do CP, conciliada com magnitudes médias dos parâmetros $n_{s,Emb,ZM}\approx0.63$, $R_{i,Emb,ZM}\approx0.28$ e de

$n_{s,5I,ZM}\approx 0.17$, definiram para este troço do canal principal um quadro de estratificação moderada e de mistura parcial, do tipo II de acordo com Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992), e condições de turbulência capazes de gerar mistura vertical, com uma dinâmica controlada pela maré (Dyer, 1989). Contudo, no braço sul toda a massa de água de mistura já descreveu um quadro muito bem misturado do tipo III, com $n_{s,BS,ZM,P6\text{-}P21}\approx 0.03$ e com $R_{i,BS,ZM,P6\text{-}P21}\approx 0.07$, associando a uma grande produção de turbulência gerada pelo fundo aquando da entrada da onda de maré neste subsistema muito pouco profundo, que se estendeu até à superfície, bem como de um regime dinâmico forçado pela maré.

Em 15/05/93 foram realizados dois perfis longitudinais ao braço sul, um no final da enchente (com a referência P60-P68) e o segundo no final da vazante (com a referência P69-P77), tendo decorrido sob uma maré morta de $A_{w,IH}\approx 1.2$m estimada pelo Instituto Hidrográfico para o sector portuário do estuário, e sob descargas do Mondego aferidas no Açude de Ponte da ordem dos $Q_{r,APC}\approx 54 m^3/s$. Ponderando as estimativas de Baptista *et al* (1995) que considera as magnitudes das descargas do Pranto como tendo sido em média da ordem dos 10% das anteriores, estas últimas foram estimadas em $Q_{r,Pranto,APC}\approx 5.4 m^3/s$. Durante a realização destes dois perfis, o sector distal esteve sujeito a uma agitação marinha, e todo o estuário encontrou-se sob um vento moderado proveniente do quadrante Oeste. Da análise do primeiro perfil longitudinal, representado na figura 5.3.1. 41, foi possível determinar que o braço sul no final da enchente foi praticamente representado longitudinalmente por uma massa de água de mistura, muito embora as salinidades superiores a $S\geq 30‰$ (ou densidades $\sigma_t\geq 21.6 kg/m^3$) tenham denunciado a presença de uma massa de água marinha junto ao fundo no sector distal deste braço periférico, que alcançou os $R_{ZC,BS,PM}\approx 3.5$km. Na parte superior desta massa de água registaram-se isohalinas (ou isopícnicas) quase sub-horizontais representativas de um gradiente vertical de salinidade associado a esta fase de maré, e que reflectiu uma fracção da massa de água de mistura que na BM do ciclo de maré precedente ficou retida no sector distal do braço sul e que aquando da enchente seguinte, parte foi empurrada para a parte

superior da massa de água marinha. A restante massa de água de mistura que permaneceu presa nos exíguos ambientes submareais localizados a montante da anterior aquando da BM, com a enchente foi impelida longitudinalmente para os sectores médio-proximal intermareais do braço sul. Da análise dos 9 perfis verticais de salinidade que compuseram o P60-P68 deste braço, constatou-se que apenas três destes apontaram para um quadro de grande mistura vertical e de ausência de estratificação com magnitudes médias que rondaram os $n_{s,P66\text{-}P68}\approx0.04$, tendo-se localizado no sector mais proximal do braço sul, entre os quilómetros 6 e 7 (figura 5.3.1. 41). Os restantes perfis, que representaram a generalidade deste canal descreveram quadros de mistura e de estratificação parcialmente misturados, do tipo II de acordo Geyer *et al* (2000), ostentando magnitudes médias para o parâmetro de estratificação e para o número de Richardson respectivamente da ordem dos $n_{s,BS,P60\text{-}P65}\approx0.32$ e dos $R_{i,BS,P60\text{-}P65}\approx0.58$. Estes últimos, também apontaram para que durante esta fase da maré morta se tenham gerado condições de turbulência no fundo capazes de causar uma mistura vertical parcial, bem como indiciaram uma dinâmica fundamentalmente controlada pela maré, de acordo com Darbyshire & West (1992). A turbulência gerada pelo atrito do vento na superfície dos escoamentos, de acordo com Bowden (1977) terá promovido a mistura vertical neste braço estuarino muito pouco profundo, mas que não foi suficiente para tornar o sistema bem misturado, tal como foi registado aquando de marés vivas, no perfil P6-P21 representado na figura 5.3.1. 40. Durante a fase da vazante a acção deste vento moderado proveniente do quadrante Oeste reflectiu-se na formação de uma agitação de superfície, resultante do atrito gerado entre estes dois fluxos com sentidos de propagação praticamente opostos, traduzindo-se um aumento relativo da turbulência e consequente incremento da mistura na coluna de água de acordo como considerado por Dyer (1973), Garvine (1977). A grande semelhança morfológica registada entre as isohalinas e as isopícnicas neste perfil, realçou a grande importância da primeira, na variação da segunda propriedade na zona de mistura do estuário.

A análise dos diagramas da figura 5.3.1. 42 que ilustraram a variação longitudinal dos quatro parâmetros físicos em estudo, no braço sul e na fase final da vazante deste ciclo de maré morta (realizado em 15/05/93 com a designação P69-P77), permitiu determinar que as isotáquias, as isotérmicas, as isohalinas e as isopícnicas apresentaram formas muito idênticas entre si, e descreveram gradientes longitudinais ao longo deste braço.

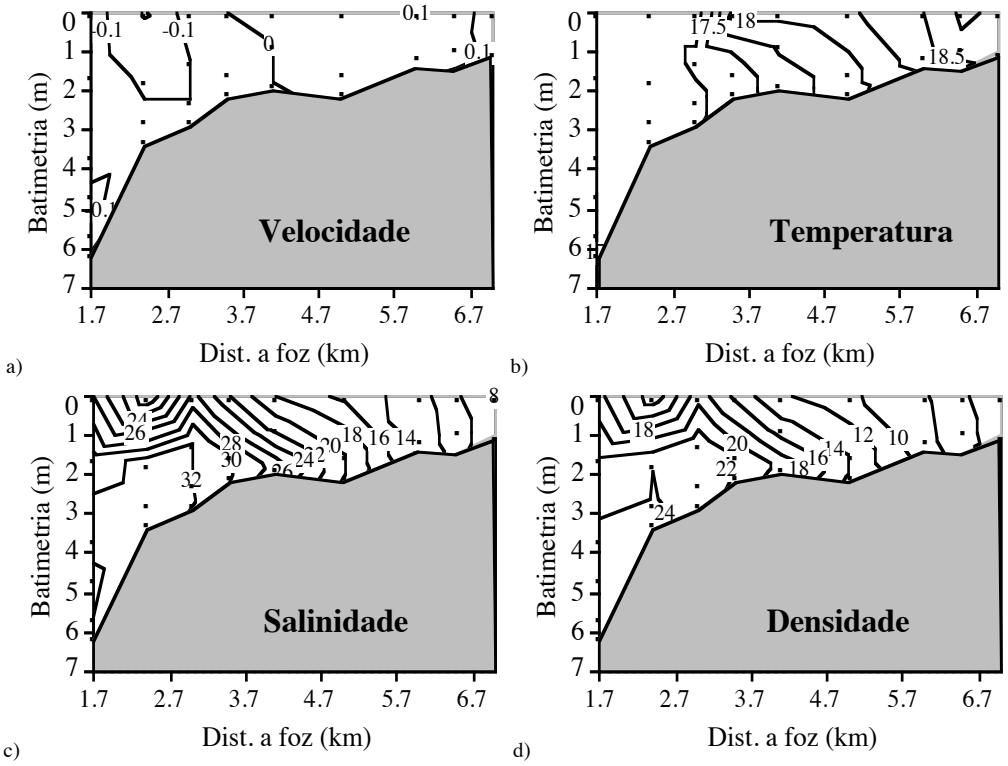


Figura 5.3.1. 41. Perfil longitudinal realizado ao longo do braço sul no final da enchente em 15/05/1993 (referência P60-P68), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade longitudinal instantânea dos escoamentos, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. No braço sul registou-se um quadro parcialmente misturado com $n_{s,BS,ZM,P60-P68} \approx 0.32$ e com $R_{i,BS,ZM,P6-P21} \approx 0.58$, associando a regime dinâmico forçado pela maré.

Definiram salinidades e densidades mais elevadas para o sector distal do BS posicionadas nos locais mais profundos. O estudo da variação espacio-temporal da velocidade instantânea neste canal[10], esquematizada no gráfico a) da figura 5.3.1. 42 realçou que as isotáquias da parte mais distal deste perfil apresentaram uma disposição quase subvertical que foi concordante com a proximidade do CP, contrastando com as do resto do braço sul que foram praticamente sub-horizontais e concordantes com a variação longitudinal da batimetria do fundo do canal. As

[10]. Em termos físicos apenas reproduz a velocidade instantânea de cada perfil efectuado na coluna de água e não relativamente ao perfil longitudinal ao canal.

primeiras reflectiram a influência dos escoamentos de vazante do canal principal que reflectiram a saída de volumes de água muito superiores aos escoados pelo braço sul, mas ambos drenados por secções transversais muito semelhantes entre si, muito embora no CP se tenha registado uma profundidade média ligeiramente superior, como se demonstrou nos itens 5.2.2 e 5.3.4.1. A média dos parâmetros de estratificação referentes aos perfis verticais realizados na zona de mistura foi da ordem dos $n_{s,BS,ZM,P69\text{-}P77} \approx 0.42$, definindo um quadro parcialmente misturado para esta fase final da vazante.

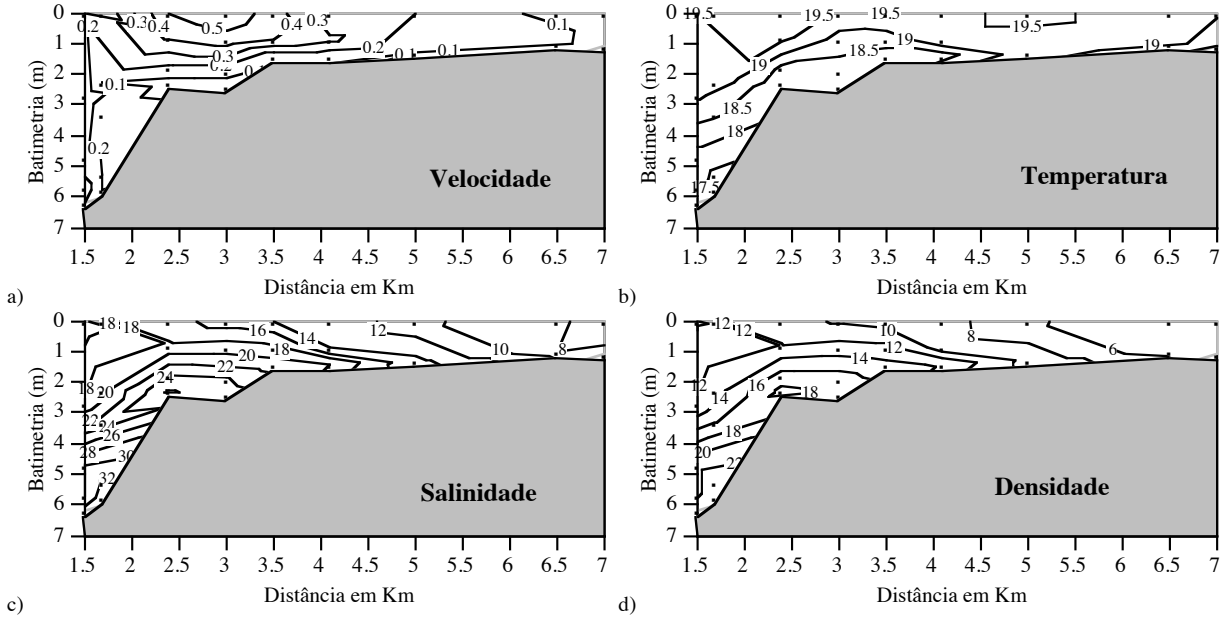


Figura 5.3.1. 42. Perfil longitudinal realizado ao longo do braço sul no final da vazante em 15/05/1993 (referência P69-P77), com a medição de vários parâmetros físicos, nomeadamente: a) velocidade, com isotáquias espaçadas 0.1m/s, b) temperatura, com isotérmicas espaçadas 0.5ºC, c) salinidade, com as isohalinas espaçadas 2‰ e d) sigma-t, com as isopícnicas espaçadas 2kg/m^3. Definiu um quadro parcialmente misturado com $n_{s,BS,ZM,P69\text{-}P77} \approx 0.42$.

Considerando a lei de Bernoulli, esta diferença de volumes ter-se-á reflectido num aumento relativo da variação da superfície livre no canal principal, traduzindo-se na criação quer de um maior gradiente barotrópico do gradiente longitudinal de pressão no CP em direcção à foz, que foi responsável pela fase da vazante, quer na produção de um gradiente lateral na superfície livre no sentido do braço sul, que foi responsável por uma parte da massa de água em movimento de vazante junto à margem esquerda do CP entrasse para a parte mais distal do braço sul, formando uma frente, que se encontra esquematizada na figura 5.3.1. 43. Esta frente, à superfície localizou-se entre o

perfil vertical P77 (distante 1.5km da foz) e o perfil P76 (distante 1.7km), separando uma massa de água proveniente do CP mais túrbida, da massa de água de mistura proveniente do BS, muito mais clara.

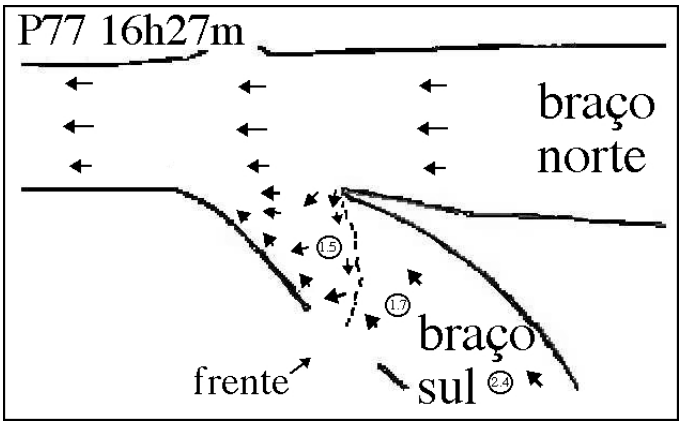


Figura 5.3.1. 43. Frente que se formou pela não mistura entre a massa de água mais túrbida proveniente do CP com a procedente do braço sul, durante a fase de vazante. Esta frente foi observada aquando da leitura dos parâmetros físicos nos perfis verticais P77 e P76, realizados respectivamente às 16h17m e às 16h27m, hora local. Na figura assinala-se a posição dos tês perfis: P77 localizado aos 1.5km, o P76 situado aos 1.7km e o p75 localizado aos 2.4km relativamente à foz do estuário. Esta frente esteve associada a um gradiente na superfície livre gerado do canal principal para o braço sul, que foi responsável pelo desvio de uma parte da massa de água superficial de vazante proveniente do braço norte para o sector mais distal do braço sul.

Na coluna de água, os dados apontam para que a primeira se tenha restringido aos dois primeiros metros, estando os restantes representados pela massa de água de mistura de vazante proveniente do braço sul que escoou desta forma para o CP. A análise destes quatro perfis também permitiu constatar, que no final da vazante todo o braço sul foi preenchido por uma massa de água de mistura, que foi impelida para montante na fase de enchente subsequente. Quanto à massa de água marinha que na PM precedente alcançou a estação da Gala, durante esta vazante ela recuou para fora do BS, tendo-se posicionado algures no sector mais distal da embocadura.

Relações determinadas entre alcance longitudinal da ZM e a magnitude dos principais agentes hidrodinâmicos

Uma vez que a estação da Embocadura durante a PM foi sempre abrangida pelo domínio marinho, consideraram-se os alcances longitudinais de ZC determinados apartir desta estação como representativos de $R_{ZC,CP,PM}$ para o canal principal. Apreciação semelhante foi tida em consideração com a estação dos Cinco Irmãos por estar localizada no sector de mistura do canal principal e desta

forma as determinações de $R_{ZM,CP,PM,5I}$ terem sido consideradas como representativas dos alcances máximos da zona de mistura no canal principal. Para o braço sul, recorreu-se à análise dos alcances longitudinais de ZC obtidos na estação da Gala por esta ter sido sempre alcançada pelo domínio marinho próximo da PM, e de nunca ter sido registado o domínio ZF neste braço. As magnitudes de $R_{ZC,PM}$ e de $R_{ZM,PM}$ obtidas apartir destas três estações foram relacionadas quer com as alturas da maré e com as descargas fluviais locais (A_w, Q_r), quer com as alturas da maré estimadas pelo IH ($A_{w,IH}$) e com as descargas do Mondego medidas no Açude de Ponte de Coimbra ($Q_{r,APC}$). Contudo, as magnitudes de $R_{ZC,CP,PM,PL}$ e de $R_{ZM,CP,PM,PL}$ obtidas apartir da análise dos perfis longitudinais aos canais mais importantes do estuário, apenas foram relacionadas com $A_{w,IH}$ e com $Q_{r,APC}$, por não se dispor de medições locais referentes à variação da superfície livre e dos caudais fluviais que alcançaram o estuário.

Quando relacionados os alcances máximos longitudinais atingidos na preia-mar pelos domínios marinho e de mistura com as magnitudes dos principais agentes hidrodinâmicos em análise, constatou-se que foram definidas várias regressões simples que descreveram tendências de variação positivas entre $R_{ZC,PM}$ ou entre $R_{ZM,PM}$ com A_w para caudais fluviais pelo menos inferiores a $Q_r<50m^3/s$ e tendências de variação negativas aquando de descargas fluviais de maior magnitude, pelo menos inferiores a $Q_{r,Mond}<155m^3/s$. As primeiras descreveram para os dois canais do estuário alcances da maré salina tendencialmente mais elevados sob marés de maior amplitude, enquanto as segundas realçaram o efeito contrário que as descargas fluviais desempenharam perante a propagação da maré salina no interior do CP, associando as maiores descargas aos menores alcances longitudinais da maré, mesmo sob as marés de maior amplitude. Sob baixos caudais fluviais ($Q_r<50m^3/s$) a variação de $R_{ZC,PM,CP}$ foi explicada somente em 24% por $A_{w,Emb}$, enquanto a variabilidade de $R_{ZM,PM,CP}$ foi explicada por apenas 8%[11]. No braço sul a variabilidade de $R_{ZC,PM,BS}$ foi explicada unicamente em 26% por $A_{w,Gala}$.

[11]. Uma vez que as duas regressões obtidas foram caracterizadas por $r^2_{Aw,Emb(Qr\leq37m3/s)}=0.24$ e por $r^2_{Aw,5I(Qr\leq46m3/s)}=0.10$.

Foram também relacionados os alcances atingidos pelo domínio marinho e pela zona de mistura com as magnitudes das descargas dos rios Mondego e do Pranto, determinadas quer nas várias estações do estuário, quer medidas no Açude de Ponte em Coimbra de acordo com os dois gráficos da figura 5.3.1. 44. Verificou-se que foram apenas obtidas regressões negativas do tipo lineares, significativas entre $R_{ZC,PM}$ e $R_{ZM,PM}$ e as descargas do Mondego, no canal principal. Estas regressões relacionaram as menores distâncias longitudinais percorridas pela maré salina no interior do estuário com as maiores descargas do Mondego, e *vice versa*. Quando comparados os resultados obtidos das variações de $R_{ZC,PM,CP}$ estimadas apartir da análise dos ciclos de maré na estação da Embocadura com as obtidas apartir da análise dos perfis longitudinais, constatou-se que as regressões obtidas foram muito similares entre si com declives iguais, mas descrevendo diferenças de magnitudes da ordem dos 1.7km. Já com os alcances máximos atingidos pela ZM determinados apartir da estação dos Cinco Irmãos com os estabelecidos apartir da dos perfis longitudinais, apresentaram entre si diferenças tendencialmente mais elevadas quer sob menores descargas fluviais, quer sob descargas mais elevadas, sugerindo que os $R_{ZM,PM,CP}$ determinados nos Cinco Irmão sob $Q_{r,5I}$<50m^3/s tenham sido subestimados, enquanto os superiores, sobrestimados. No braço sul não se definiu qualquer tipo de tendência de variação de $R_{ZC,PM,BS}$ com as descargas fluviais, como se ilustra nos gráficos da figura 5.3.1. 44, mas sim apenas com $A_{w,Gala}$. Este facto quando conciliado com a não determinação de $R_{ZM,PM,BS}$ por a zona de mistura se ter estendido longitudinalmente praticamente por todo o braço sul sem se registar o domínio fluvial, reforçou o carácter de canal periférico e de maré deste braço. As regressões obtidas, também permitiram constatar que as descargas do Mondego medidas no CP explicaram cerca de 84% da variabilidade do alcance do domínio $R_{ZC,PM,CP}$, e cerca de 61% da variabilidade do limite superior da zona de mistura $R_{ZM,PM,CP}$, enquanto as descargas do Mondego medidas no Açude de Ponte em Coimbra explicaram 78% da variabilidade de $R_{ZC,PM,CP}$, e descreveram 70% da variabilidade de $R_{ZM,PM,CP}$ (figura 5.3.1. 44). Foram testadas regressões múltiplas entre $R_{ZM,CP}$ com A_w e com Q_r, tendo-se

obtido regressões não significativas. Quando comparadas estas regressões com as tendências de variação obtidas em função de A_w tornou-se possível deduzir que as variações longitudinais de $R_{ZC,PM}$ e de $R_{ZM,PM}$ no canal principal do estuário encontraram-se muito mais condicionadas pelas descargas do Mondego, enquanto no braço sul terão estado fundamentalmente relacionadas com a variação da altura da maré, comportando-se este como um canal de maré, *sensus* Bowden (1978).

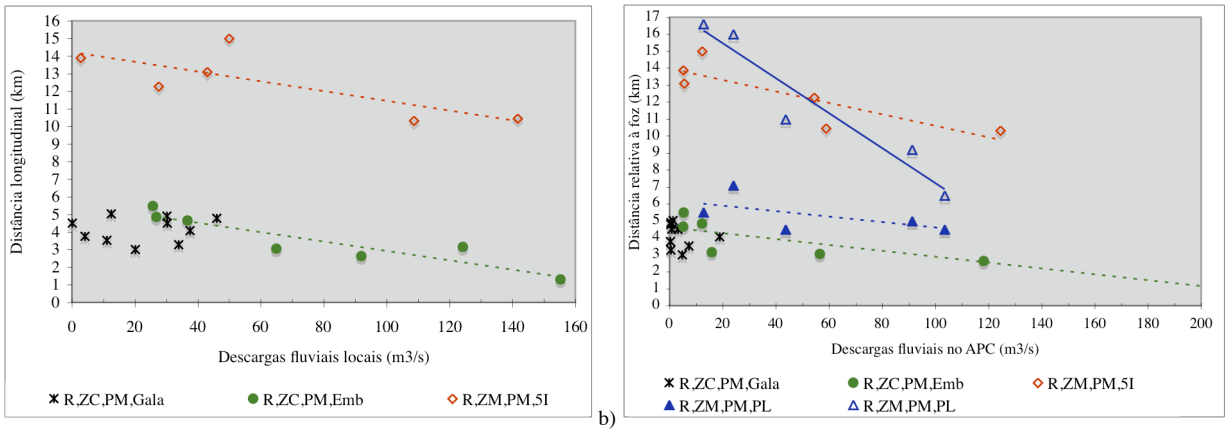


Figura 5.3.1. 44. Ilustram-se as regressões obtidas entre os alcances máximos atingidos pelos domínios marinho ($R_{ZC,PM}$) e de mistura ($R_{ZM,PM}$) aquando da PM, no canal principal (CP) e no braço sul (BS), em função das magnitudes das descargas fluviais. No gráfico a) encontram-se relacionadas as variações das magnitudes de $R_{ZC,PM}$ e de $R_{ZM,PM}$ obtidas para o canal principal e para o braço sul, com as descargas fluviais dos rios Mondego e Pranto medidas nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Gala. As regressões obtidas foram definidas por: $R_{ZC,PM,CP}$=-0.0265*$Q_{r,Emb}$+5.5842, com r^2=0.84, r=0.92, p<0.05, N=7 e por $R_{ZM,PM,CP}$=-0.0278*$Q_{r,5I}$+14.236 com r^2=0.61, r=0.78, N=6. No gráfico b) ilustram-se as regressões negativas obtidas quando relacionadas as magnitudes de $R_{ZC,PM}$ e de $R_{ZM,PM}$ com as descargas do Mondego medidas no Açude de Ponte em Coimbra. O domínio marinho foi representado por $R_{ZC,PM,CP}$=-0.0173*$Q_{r,APC}$+4.6137, com r^2=0.78, r=0.88, p<0.05, N=7 quando relacionados os valores obtidos na estação da Embocadura e por $R_{ZC,PM,PL}$=-0.016*$Q_{r,APC}$+6.2025, com r^2=0.36, r=0.60, N=5 quando relacionados os valores obtidos com a análise dos perfis longitudinais. Para a zona de mistura obteve-se a regressão $R_{ZM,PM,CP}$=-0.0337*$Q_{r,APC}$+13.968, com r^2=0.70, r=0.84, N=6 quando relacionados os valores referentes à estação dos Cinco Irmãos e por $R_{ZM,PM,PL}$=-0.0173*$Q_{r,APC}$+4.6137, com r^2=0.78, r=0.88, p<0.05, N=7, quando analisados os dos obtidos nos perfis longitudinais. Na legenda a designação "Gala" refere-se aos parâmetros obtidos na estação da Gala, "Emb" aos da estação da Embocadura, "5I" aos da estação dos Cinco Irmãos, "PL" aos obtidos nos perfis longitudinais no canal principal, "PM" representou a fase da preia-mar, "ZC" o domínio marinho e "ZM" correspondeu à zona de mistura.

Para o comportamento hidrodinâmico registado no CP terá contribuído em grande parte quer as perdas de energia associadas ao atrito de fundo aquando da propagação da onda de maré ao longo deste canal pouco profundo, quer a reduzida dimensão longitudinal deste canal, barrado superiormente pelos enrocamentos transversais localizados a montante das pontes da Granja e da Formoselha[12]. Estas estruturas transversais ao CP foram responsáveis pela reflexão da onda durante a fase da enchente, conferindo-lhe um carácter combinado estacionário+progressivo conforme

[12]. Localizados respectivamente a 25.9km e a 28.5km da foz.

demonstrado nos itens 5.2.2.1 e 5.3.5, e conforme descrito por van Rijn (1994) em outros estuários. Quanto à diferença de comportamentos da variação longitudinal dos diferentes domínios dinâmicos registados entre os dois braços, terão estado relacionados fundamentalmente com as diferenças fisiográficas assinaladas entre eles, bem como com as distintas proveniências e magnitudes dos aportes de água doce que chegaram aos dois canais do estuário.

Gradiente Horizontal de Pressão

Considerou-se que os caudais fluviais corresponderam a águas frescas de natureza continental que foram responsáveis por gerar uma componente de circulação estuarina de superfície com um movimento unidireccional com sentido para o mar (MacCready, 1999). Estes também apresentaram um efeito de diluição da água do mar, causando gradientes verticais ($\partial S/\partial z$) e longitudinais ($\partial S/\partial x$) de salinidade (ou de densidade) capazes de induzir movimentos para a superfície e para montante no estuário devido ao gradiente de pressão gerado, condicionando a estrutura dinâmica deste sistema, de acordo com Cudaback & Jay (2000). Os gradientes de salinidade gerados ao longo de um ciclo de maré, quer na coluna de água, quer longitudinalmente ao estuário realçaram o efeito de diluição da água do mar causado pelas descargas fluviais, ficando uma parte desta água de mistura retida no interior do sistema (massa de água estuarina). Este gradiente de salinidade ou efeito baroclínico foi contrariado por uma outra componente associada ao movimento da massa de água fluvial superficial, que se processou sempre no sentido de vazante. Já a co-oscilação da maré foi definida por períodos bem conhecidos e gerada apartir de movimentos de massa fundamentalmente resultantes dos gradientes longitudinais de densidade e da superfície livre produzidos no interior do estuário, mas que puderam ser explicados como resultado da actuação das principais forças de baixa frequência, cujos efeitos causados também foram descritos com base em dados experimentais locais, à semelhança do proposto por Miranda *et al* (2002). Teoricamente estas podem ser diferenciadas em duas componentes principais no gradiente de pressão gerado num estuário, tendo por base a decomposição da equação fundamental da

hidrostática segundo as componentes vertical e horizontal, considerando um sistema de reduzidas dimensões e sem estar sujeito a descargas fluviais (van Rijn, 1994 e Miranda *et al*, 2002). De acordo com os referidos autores, o gradiente de pressão gerado na coluna de água num estuário como o do Mondego pode ser representado pela expressão $(\partial p/\partial z)=-\rho g$, mas devido à reduzida profundidade média exibida por este sistema, da ordem dos $\bar{h}_{E,Mond} \approx 2.5m$, pode ser considerada exígua a componente hidrostática. Quanto ao gradiente longitudinal de pressão gerado no interior do estuário, de acordo com van Rijn (1994) pode ser representado pela expressão $(\partial p/\partial x)=g\rho_\eta \frac{\partial \eta}{\partial x}+g\int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x}\cdot dz$, em que relaciona o efeito barotrópico que é responsável por movimentos estuário acima durante a enchente (com $\partial\eta/\partial x>0m/km$) e estuário abaixo durante a vazante (com $\partial\eta/\partial x<0m/km$), com o efeito baroclínico ($\partial S/\partial x>0‰/km$) que tende a gerar permanentemente movimentos da massa de água salina para o interior do estuário. Uma vez que o procedimento metodológico escolhido para a obtenção das séries de dados maregráficos medidas nas quatro estações do estuário (Emb, 5I, EE e Gala) não permitiram o cálculo das magnitudes dos gradientes barotrópicos ou baroclínicos gerados ao longo do CP ou do BS por as referidas campanhas não terem sido compostas por ciclos de maré simultâneos no tempo, mas sim obtidos em dias consecutivos com diferenças médias diárias na variação da superfície livre da ordem dos 0.13m (quadro 5.1.1), recorreu-se ao modelo proposto por Pitchard (1971) *in* Miranda *et al* (2002). Este permitiu conhecer as ordens de grandeza das magnitudes teóricas médias das componentes dos gradientes barotrópico e baroclínico responsáveis pela componente longitudinal da força de gradiente de pressão gerada no canal principal do estuário do Mondego, sob condições médias da altura da maré e pressão atmosférica espacialmente constante. Optou-se por não aplicar este modelo ao braço sul, por este canal desempenhar uma posição periférica quanto à entrada da maré no estuário. Para tal, considerou-se que o canal principal apresentou uma largura média da ordem dos $\bar{b}_{CP} \approx 265m$, uma profundidade média de $\bar{h}_{CP} \approx 2.7m$ e um comprimento longitudinal máximo de

L_{CP}≈28.5km, de acordo com o determinado no item 5.2.2.1. Também se teve em consideração que para marés médias anuais de altura AMM≈1.6m, o alcance longitudinal médio da zona de mistura aquando da PM foi da ordem dos $R_{ZM,PM,CP}$≈13.1km sob de descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}$≈26m^3/s e apresentou variações longitudinais da salinidade da ordem dos $(\partial S/\partial x)_{CP}$≈35‰, de acordo com os resultados obtidos da análise das séries maregráficas correspondentes ao CP da campanha de campo 5-80392.

São apresentados no quadro 5.3.1. 2 as ordens de grandeza das magnitudes teóricas médias estimadas para as componentes dos gradientes barotrópico e baroclínico que contribuíram para a componente longitudinal da força de gradiente de pressão por unidade de massa, determinadas para as duas fase da maré do canal principal do estuário, tendo por base o modelo proposto por Pitchard, 1971 *in* Miranda *et al* (2002) que se representa no item 4.3.

Quadro 5.3.1. 2. Ordens de grandeza das componentes barotrópica e baroclínica da componente longitudinal da força de gradiente de pressão por unidade de massa determinado para o canal principal do estuário do Mondego. Estas foram expressas em N/m^2 e tiveram por base uma maré média de AMM≈1.6m, sob descargas $Q_{r,Emb}$≈26m^3/s, um comprimento longitudinal da zona de mistura de $R_{ZM,PM,CP}$ ≈13.1km e uma profundidade média deste canal de h_{CP}≈2.7m, determinados com base na análise das séries de dados maregráficos de E080392 e de 5I70372 aquando da campanha de campo de 5-80392.

	Enchente	Vazante
Comp.barotrópica	-1.17E-06	1.17E-06
Comp.baroclínica	-4.83E-08	0.00

Dos resultados obtidos, foi possível apurar que a componente longitudinal da força do gradiente de pressão por unidade de massa, a qual gera no estuário movimentos dirigidos das regiões de alta para regiões de menor pressão, terá sido fundamentalmente regulada pelo gradiente barotrópico, por esta componente ter representado cerca de 96% da referida força. À semelhança de Bowden (1977) e Dyer (1989) que consideraram que o gradiente horizontal de pressão definido em estuários similares ao do Mondego, resultou de variações da superfície livre geradas fundamentalmente pela onda de maré astronómica e pelas descargas fluviais, levou a considerar que os resultados obtidos referentes aos movimentos de massa horizontais no canal principal também foram essencialmente regulados pela variação da altura da maré, já que foram determinados sob

condições locais de baixas descargas fluviais[13]. Também foi possível constatar que as ordens de grandeza das intensidades máximas estimadas para o gradiente horizontal de pressão representadas no quadro 5.3.1. 2 terão definido para o sector distal do CP velocidades da ordem dos $u_{e,max} \approx -0.42 ms^{-2}$ e dos $u_{v,max} \approx 0.50 ms^{-2}$ registadas aquando dos caudais máximos de enchente e de vazante na estação da Embocadura em E80392, e definido gradientes nulos aquando das estofas da maré. Importa também realçar, que o efeito dinâmico gerado pela maré, de natureza barotrópica foi proporcional ao valor negativo da inclinação da superfície livre e foi independente da profundidade do estuário, assumindo valores negativos durante as enchentes e positivos nas vazantes (quadro 5.3.1. 2). Contudo, o modelo adoptado para a estimação de $\partial p/\partial x$ não entrou em consideração com aspectos de natureza fisiográfica ou relacionados com o atrito de fundo, que foram em muito responsáveis pela distorção da maré e consequentemente pela não ocorrência das magnitudes máximas do gradiente de pressão longitudinal a meio daquelas duas fases.

O aumento da salinidade verificado longitudinalmente ao estuário segundo o sentido da foz responsável por um gradiente longitudinal de densidade[14], reflectiu a componente baroclínica do gradiente horizontal de pressão, que por sua vez foi responsável por uma força que impeliu permanentemente a massa de água mais salina para o interior deste sistema, à semelhança do descrito e considerado por Valle-Levinson & Atkinson (1999) e por Cudaback & Jay (2000) para outros sistemas costeiros similares. A componente baroclínica desta força estimada para o CP e representada no quadro 5.3.1. 2 não só reflectiu ter tido apenas um peso relativo da ordem dos 4% nos movimentos de massa horizontais gerados neste canal[15] na enchente, como terá sido teoricamente nulo no final da vazante se porventura toda a zona de mistura tivesse sido deslocada para fora da boca do estuário, como exemplificado em Miranda *et al* (2002). Desta forma nos quadros hidrodinâmicos definidos por baixas descargas fluviais, os principais movimentos longitudinais ascendentes e descendentes da massas de água estuarina e consequentemente no

[13] E as séries de dados maregráficos foram obtidas sob condições meteorológicas locais consideradas amenas.
[14]. Representado anteriormente por exemplo nas figuras 5.3.23 e 5.3.24.
[15]. Gerados pelo gradiente horizontal de pressão.

controle dos principais processos de mistura[16] ocorridos nos dois canais do estuário, à semelhança do considerado por Dyer (1997); Valle-Levinson & Li (2000) terão sido regulados fundamentalmente pela actuação conjunta de duas componentes, uma dominante de natureza barotrópica gerada pela maré e uma baroclínica resultante dos gradientes longitudinais de salinidade formados. Contudo, segundo Miranda *et al* (2002) a importância relativa dos gradientes barotrópicos e baroclínicos gerados pelas descargas fluviais de entre os demais que intervieram nos processos de mistura, tornou-se superior em sistemas dominados pelos regimes fluviais, aumentando aquela de uma forma proporcional ao incremento dos aportes de água doce. Desta forma, para caracterizar os graus de mistura e estratificação neste sistema costeiro, tendo em consideração a competição acontecida entre os principais agentes condicionantes dos movimentos longitudinais da massa de água estuarina, propuseram-se dois diagramas estratificação-circulação que se encontram expostos no item 5.3.6.5. Estes definiram vários quadros de mistura, estratificação e circulação para os dois canais do estuário do Mondego, fundamentados nas relações medidas localmente entre os volumes fluviais drenados para o sistema e o prisma de maré.

Contextos Hidrodinâmicos

Uma vez que a componente barotrópica do gradiente horizontal de pressão, resultou das variações da superfície livre geradas fundamentalmente pela onda de maré astronómica e pelas descargas fluviais, à semelhança do defendido por Dyer (1989), considerou-se que a actuação conjunta daquela conjugada com uma menor escala pela componente baroclínica, terão sido responsáveis pelos movimentos ascendentes e descendentes da massa de água estuarina e consequentemente pelos processos de mistura no estuário do Mondego. Assim, considerou-se que na transição da vazante para a enchente a inclinação da superfície livre terá sido zero [com $(\partial\eta/\partial x)_{BM}$=0m/km] e o efeito dinâmico da componente barotrópica terá sido nulo, verificando-se a estofa da BM com $\bar{u}_z$ =0m/s. Quando nesta fase, ainda se registou um fraco movimento de vazante

[16]. Advecção e difusão turbulenta.

na parte superficial dos escoamentos, este ter-se-á devido a um ligeiro gradiente barotrópico gerado na superfície dos escoamentos causado pelas fracas descargas fluviais, como são exemplo os diagramas da figura 5.3.2.2 das estação da Embocadura. Nos quadros hidrodinâmicos em que se verificou um atraso da estofa da BM relativamente à BM (atraso este que se tornou mais elevado do fundo para a superfície dos escoamentos), este fundamentalmente ter-se-á relacionado com a acção do atrito de fundo e com o efeito da componente barotrópica das descargas fluviais que actuou no sentido de gerar gradientes na superfície livre para fora do estuário.

Na mudança da enchente para a vazante, a inclinação da superfície livre também terá sido zero com $(\partial\eta/\partial x)_{PM}$=0m/km, pelo que à semelhança da fase anterior, o efeito dinâmico da componente barotrópica foi nulo, tendo coincidido a estofa da maré com a PM. Nas situações em que nesta fase de maior altura da coluna de água se registou um atraso da estofa da PM relativamente à PM, e que este atraso se tornou maior da superfície em direcção ao fundo, neste caso reflectiu um efeito dinâmico gerado basicamente pelo atrito de fundo, conforme se demonstra no item 5.3.5. Nesta fase da maré, o gradiente barotrópico gerado pelas descargas fluviais no estuário ter-se-á traduzido na produção de uma inclinação na superfície livre em direcção ao mar que propendeu a neutralizar o gradiente gerado em sentido contrário pela fase de enchente da maré oceânica. Desta forma tendeu a antecipar a ocorrência da estofa da PM relativamente à PM com $(\partial\eta/\partial x)_{PM}\approx$0m/km. Este efeito dinâmico ter-se-á feito sentir com maior intensidade à superfície dos escoamentos uma vez que a massa de água fluvial, menos densa circulou sempre sobre a marinha. Porém o efeito dinâmico gerado pelo atrito de fundo esteve sempre presente nesta fase terminal da enchente, muito embora a variação da altura da maré o possa ter condicionado. Já o efeito barotrópico contrário gerado pelas descargas fluviais dependeu da magnitude das descargas dos mesmos, tendo sido praticamente nulo aquando de descargas fluviais vestígiais.

5.3.2. Hidráulica dos Escoamentos

5.3.2.1. Padrões de Circulação

Tendo por base a análise das séries temporais relativas à distribuição da velocidade e aos volumes líquidos que circularam pelos três pontos de amostragem que caracterizaram cada uma das quatro estações do estuário, tornou-se possível definir vários padrões de circulação das principais massas de água. Não pretendendo tornar a apresentação dos dados e a respectiva discussão exaustiva, procedeu-se à análise de séries de dados consideradas representativas dos principais quadros de circulação registados nos diversos sectores do estuário.

Analisados os seis ciclos completos de maré estudados na estação da Embocadura que abrangeram quadros hidrodinâmicos de marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6$m e das cargas fluviais compreendidas entre os $27 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, tornou-se possível identificar vários padrões globais de circulação das diferentes massas de água que circularam por este sector do estuário em diferentes fases. Sob uma maré morta e regimes fluviais pequenos, de que é exemplo a série de dados E150392 com $A_{w,E150393} \approx 1.3$m e com $Q_{r,E150392} \approx 37 m^3/s$, verificou-se que a enchente iniciou-se junto ao fundo pelo sector sul deste canal por volta as 6.90h e apresentou um atraso na secção transversal em direcção ao sector norte da ordem das 0.41h, em resultado da entrada preferencial da maré por aquele sector do canal. Na coluna de água o atraso da estofa da BM foi superior, da ordem das 1.80h, tendo reflectido um atraso muito elevado junto à superfície, dado que a estofa da BM dos escoamentos de superfície teve lugar 1.70h depois da estofa dos escoamentos médios[1], e estes por sua vez apresentaram um atraso de apenas 0.10h relativamente ao fundo. Este aumento, do atraso da ocorrência da estofa da BM, muito elevado junto à superfície, relacionou-se com a distorção fluvial sofrida que se traduziu na formação de frentes representadas pelos esquemas E21, E23 e E24 da figura 5.3.9, e que reflectiram a convergência de massas de água distintas com sentidos de propagação contrários. Após a ocorrência da estofa

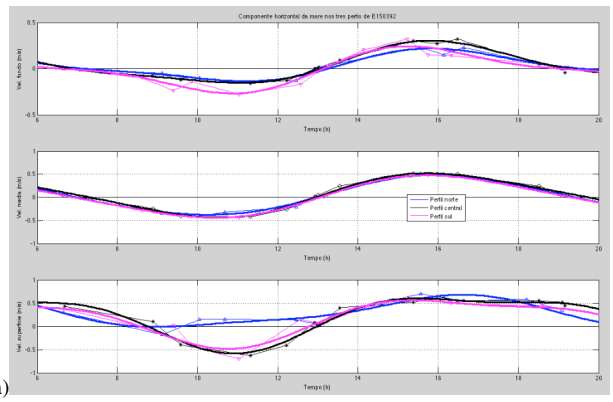
[1]. ou, velocidade integrada na coluna de água.

da BM, nos diferentes níveis batimétricos em análise, os escoamentos passaram a movimentar-se para montante com velocidades crescentes, muito embora no perfil norte, o período de enchente dos escoamentos de superfície tenha sido muito curto, da ordem das 0.40 horas, uma vez que a estofa da PM em E(N) teve lugar por volta das 9.30 horas. Neste perfil, E(N), as velocidades máximas de superfície da enchente tiveram lugar por volta das 9.20horas e apresentaram uma magnitude de ≈-0.01m/s. Após esta curta fase de enchente, os escoamentos de superfície do sector norte do canal tornaram-se de vazante, dando origem à formação de uma frente com forma complexa esquematizada na figura 5.3.9 e que se posicionou entre E(N) e E(M). Este complexo quadro dinâmico prolongou-se até por volta das 13 horas, altura em que nos escoamentos de superfície ocorreu a estofa da PM no perfil central. Contudo, por volta das 12.57h, a 0.93 da enchente, formou-se uma nova frente na estação da Embocadura localizada entre o perfil sul e o perfil central, uma vez que o primeiro passou a apresentar escoamentos superficiais de vazante provenientes da drenagem preferencial do braço sul pelo sector sul desta estação, de acordo com o esquema e) da figura 5.3.1.9. Apartir das 13h e com o evoluir desta fase final da maré enchente, as duas frentes anteriores juntaram-se e formaram uma única em forma de "\" que passou a deslocar-se ao longo do canal da Embocadura em direcção à foz (figura 5.3.1.9.f). O facto de o braço sul começar a vazar primeiramente aos escoamentos do CP (na estação da Embocadura os escoamentos encontravam-se ainda em fase terminal de enchente), foi também corroborado pelos dados referentes às amplitudes de variação das marés determinadas no item 5.1.1, que determinaram amplitudes em média ≈0.1m superiores da estação 5 para a estação 4 [2] (quadro 5.1.1), e desta forma definiram um gradiente barotrópico em direcção ao mar na fase da preia-mar. A análise da variação da velocidade e da salinidade na coluna de água expressas nas figuras 5.3.2. 2 e 5.3.1.11, permitiu determinar que a massa de água de mistura provenientes do braço norte e que circulou preferencialmente pelo sector norte da estação da Embocadura atingiu uma

[2]. Praticamente coincidentes com as estações da Gala e da Embocadura.

espessura da ordem dos 2m, enquanto a massa de água de mistura proveniente do braço sul e que drenou o sector sul desta estação alcançou uma espessura da ordem de 1m. Durante a enchente, as maiores magnitudes da velocidade foram sempre registadas no sector sul, bem como, os maiores períodos da enchente, pelo que se considerou que ocorreu um domínio desta fase pela margem esquerda deste canal. Registaram-se as maiores magnitudes das velocidades médias e de fundo no sector sul, por volta das 10.47h e das 11h, ou seja, a 0.52 e a 0.61 da enchente, com magnitudes que rondaram os $u_{b,max,E(S)} \approx -0.45$m/s e os $u_{b,max,E(S)} \approx -0.19$m/s, respectivamente. Na secção transversal, os gradientes registados destas velocidades foram de apenas $(\partial \overline{u} / \partial y) \approx -0.06$m/s para os escoamentos médios e de $(\partial u_b / \partial y) \approx -0.15$m/s para os de fundo. Após a ocorrência destes valores máximos, os escoamentos passaram a desacelerar até à estofa da PM, que para os escoamentos médios teve lugar por volta das 13.03h e para os de fundo por volta das 13.13h, praticamente em simultâneo nos três perfis. Estes resultados permitiram determinar o período de enchente dos escoamentos de fundo em 6.24h, em 5.97h para os escoamentos médios e em apenas 2.97 horas para os de superfície. Estes períodos da enchente aumentaram do perfil norte para o perfil sul. A distribuição vertical da velocidade nesta fase da enchente foi definida por gradientes muito elevados junto ao fundo, que tenderam a decrescer em direcção à superfície. Este comportamento na variação da velocidade do tipo logaritmo representou praticamente toda a coluna de água com excepção para os dois primeiros metros superficiais, que nos perfis medidos em E(N) foram caracterizados por uma forte desaceleração, que foi mais elevada para a superfície, de acordo com a figura 5.3.2. 2 e à semelhança do descrito em Geyer *et al* (2000). Esta resultou da confluência de duas massas de água em circulação em sentidos contrários, designadamente a marinha segundo a enchente com a massa de água de mistura menos densa em movimento segundo a vazante e proveniente do canal principal. Com o evoluir daquela fase da maré no sector norte do canal, as duas massas de água passaram a definir uma circulação estuarina clássica de acordo com Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e van Rijn (1994). Na

fase final da enchente, no perfil sul, os escoamentos no primeiro metro da superfície também passaram a apresentar uma desaceleração ou a definir uma massa de água em movimento de vazante, em resultado do escoamento da massa de água de mistura proveniente do braço sul (figura 5.3.2. 2). Os restantes perfis de velocidade medidos durante a enchente em E(M) e E(S) evidenciaram uma aceleração no primeiro metro junto à superfície em resultado da acção do vento fraco de NW que se fez sentir durante toda a manhã e que foi concordante com a direcção e o sentido de propagação da corrente (figura 5.3.2. 2).

a) 

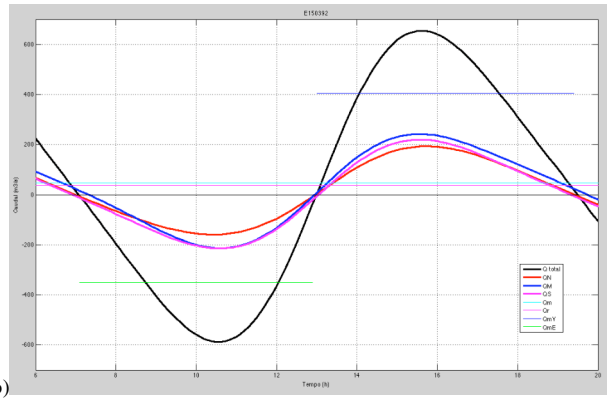
b) 

Figura 5.3.2. 1. No gráfico a) ilustra-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem que definiram a estação Embocadura em E150392, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,Emb}$≈1.3m e descargas fluviais de $Q_{r,Emb}$≈37m^3/s. No gráfico b) expressam-se os caudais líquidos (expressos em m^3/s) que circularam neste ciclo de maré, pelos sectores norte (QN), central (QM), sul (QS), e pela secção transversal do canal (Q total), tendo em consideração que as respectivas secções molhadas médias foram da ordem dos 403m^2, de 464m^2 e de 464m^2. Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Qm), o caudal médio referente às descargas fluviais (Qr) e os caudais médios referentes às fases da enchente e a vazante (QmE; QmV).

A fase da vazante teve início à superfície dos escoamentos pelo sector norte desta estação (figuras 5.3.2. 1.a e 5.3.2. 2.a). Com o evoluir desta fase verificou-se ter havido uma aceleração dos escoamentos em toda a coluna de água até ocorrerem as velocidades máximas que primeiramente tiveram lugar junto ao fundo por volta das 15.60h (a 0.40 desta fase), com uma magnitude média no canal da ordem dos +0.25m/s, e que foi representativa de um gradiente transversal de apenas $(\partial u_b/\partial y)$≈0.09m/s. Seguiu-se-lhes as velocidades máximas dos escoamentos médios, que aconteceram por volta das 15.77h (a 0.43 desta fase) com uma magnitude média de ≈+0.49m/s e representou gradiente transversal de apenas $(\partial \bar{u}/\partial y)$≈0.03m/s.

Nestes níveis, as velocidades de maior magnitude e os maiores volumes de vazante foram registados sempre na parte central do canal (figura 5.3.2. 1). Nesta estação as três secções molhadas definidas pelos perfis E(S), E(M) e E(N) foram em média da ordem dos 459m^2, dos 464m^2 e dos 404m^2. Nos escoamentos de superfície, as velocidades máximas de vazante tiveram lugar pelas 15h80, também a 0.43 desta fase, tendo apresentado magnitudes ainda superiores, da ordem dos +0.62m/s, e representativas de gradientes transversais mais elevados da ordem dos $(\partial u_s / \partial y) \approx 0.12$m/s. Os maiores atrasos e as velocidade de maior magnitude tiveram lugar no sector norte deste canal e reflectiram um escoamento preferencial da massa de água fluvial e a contribuição de u_r. Com a definição da estofa da BM estimou-se o período médio de vazante para o canal em 9.45h para os escoamentos de superfície, em 6.45h para os escoamentos médios e em 6.18h para os de fundo. Na secção transversal, registaram-se os maiores períodos de vazante no perfil central. A análise dos períodos das duas fases deste ciclo de maré, revelaram enchentes um pouco mais longas junto ao fundo (com $\Delta t \approx 0.10$h) e vazantes sucessivamente mais extensas nos escoamentos médios para os de superfície, com $\Delta t \approx 0.51$h e com $\Delta t \approx 6.48$h, respectivamente. Estes indiciaram um domínio da maré junto ao fundo e um sucessivo aumento da distorção por parte das descargas do Mondego para superfície dos escoamentos, muito embora estas tenham sido estimadas somente em $Q_{r,Emb}$=37m^3/s. A análise dos vários perfis, referentes à variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água medidos durante a vazante, determinaram a ocorrência de um gradiente vertical muito elevado junto ao fundo, que foi decrescendo em direcção à superfície. Este apresentou um comportamento de variação do tipo logaritmo, definindo uma camada limite de fundo que se estendeu por toda a coluna de água (figura 5.3.2. 2.a). Os perfis realizados em E(N) e E(M) evidenciaram uma ligeira aceleração nos 1.5m superficiais em resultado das correntes de origem fluvial u_r.

A análise do gráfico b) da figura 5.3.2. 1 que representa a variação dos volumes na estação da Embocadura no ciclo de maré E150392, permitiu determinar que os volumes da fase de

vazante foram superiores aos da enchente, e estiveram relacionados com as descargas fluviais. Na fase da enchente os maiores volumes da massa de água marinha entraram pelo sector sul, muito embora a secção molhada representada por E(S) tenha sido inferior à de $S_{m,E(M)}$. Este aspecto quando conciliado com o registo em E(S) da maior amplitude da constituinte M_2 da velocidade, da ocorrência dos maiores períodos de enchente, do registo das maiores velocidades de enchente, das maiores amplitudes da variação da velocidade na secção[3], terão reflectido não somente uma entrada preferencial da maré enchente pelo sector sul deste canal, mas também um maior hidrodinamismo, que se relacionou com a sua interacção com a fisiografia da embocadura. Neste sector portuário do estuário, a fase da vazante também se iniciou no sector distal do braço sul, com a drenagem para a parte superficial do sector sul da estação da Embocadura, de parte da massa de água de mistura proveniente do braço sul, quando a massa de água marinha ainda se encontrava na fase terminal de enchente no sector distal do CP. Na fase da vazante verificou-se ter havido uma drenagem preferencial da massa de água proveniente do braço norte pela parte central do canal, registando-se ali os maiores volumes de vazante. Porém, as descargas do Mondego fizeram-se sentir com uma maior intensidade na parte superficial dos escoamentos no sector norte do canal, em resultado da curvatura do braço norte ter canalizado aquelas para a margem direita dos troços de canal do sector distal do braço norte e do sector proximal da embocadura. Os finais da vazante e da enchente foram caracterizados por quadros hidrodinâmicos de superfície muito complexos com a formação de várias frentes de massas de água que se movem de sentidos opostos. Em ambas as fases da maré a camada limite de fundo estendeu-se por toda a coluna de água, relacionando os perfis verticais da componente horizontal da velocidade com uma distorção resultante da acção do atrito de fundo (não considerando as fases de transição da maré e os 1.5m a 2m superficiais da generalidade dos escoamentos). Este

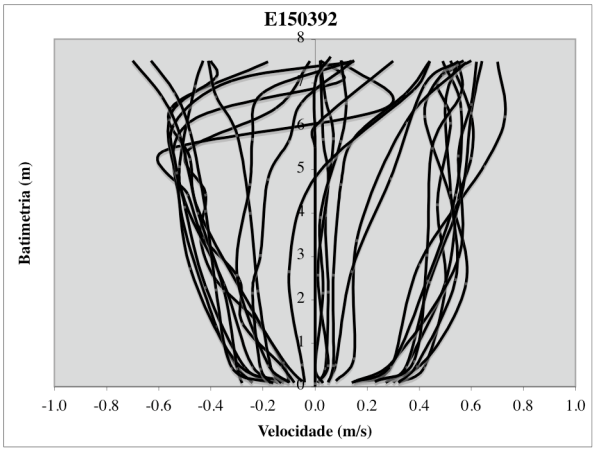
[3]. enquanto os menores valores destes parâmetros se localizaram no perfil norte, E(N).

padrão de circulação foi registado neste sector do estuário quer sob marés mortas, quer vivas, sob baixas a moderas descargas do Mondego.

Sob descargas elevadas do Mondego, por exemplo da ordem dos $Q_{r,APC} \approx 82 m^3/s$, continuou a verificar-se nas fases de mudança da maré a formação de frentes de superfície resultantes da confluência de massas de água distintas, descritas anteriormente, só que apresentaram deslocamentos longitudinais mais rápidos em resultado do aumento do hidrodinamismo. Perdurou o domínio da maré pelo sector sul desta estação e uma drenagem preferencial dos caudais do Mondego pelo sector norte. Acentuou-se a assimetria entre as duas fases da maré com um incremento das velocidades e dos períodos da vazante em detrimento das de enchente, bem como, verificou-se um aumento relativo nos desfasamentos temporais entre as componentes vertical e horizontal da maré. Para além de um decréscimo relativo das magnitudes das velocidades máximas da enchente, verificou-se ter havido um aumento do gradiente da velocidade na coluna de água, que na fase da enchente se reflectiu numa camada limite de fundo que se circunscreveu aos 2-3 primeiros metros, em resultado de na restante coluna de água, a distribuição da velocidade ter reflectido um forte amortecimento causado pelas velocidades fluviais que se propagaram em sentido contrário (figura 5.3.2. 2.b). Na vazante, a distribuição vertical da velocidade descreveu uma camada limite de fundo restrita aos primeiros 1-2m, tendo a restante altura do escoamento sido caracterizada por uma aceleração crescente em direcção à superfície em resultado da contribuição da velocidade u_r. Desta forma, a distorção de natureza fluvial fez-se sentir em praticamente toda a altura do escoamento, traduzindo-se na distribuição vertical da velocidade por uma aceleração na fase da vazante, ao serem adicionados os perfis de velocidades resultantes da acção do atrito de fundo com o das descargas fluviais. Na fase da enchente, estes perfis dispuseram-se em sentidos contrários pelo que a distorção fluvial contribuiu para uma desaceleração dos escoamentos de enchente, que foi mais elevada para a superfície. Estas variações verticais na velocidade traduziram uma forte turbulência gerada entre

diferentes massas de água definidas por movimentos diferenciais, que na fase de enchente foram de sentidos opostos, mas também em resultado do aumento do hidrodinamismo que face às reduzidas dimensões deste canal, terá fomentado a turbulência (quadro 5.2.3. no item 5.2.2.1). A análise de quadros hidrodinâmicos similares, representados pelos gráficos das séries: E181291, E70293, E190593, E111193, E81293 e E50295, corroboram este padrão de circulação.

a)



b)

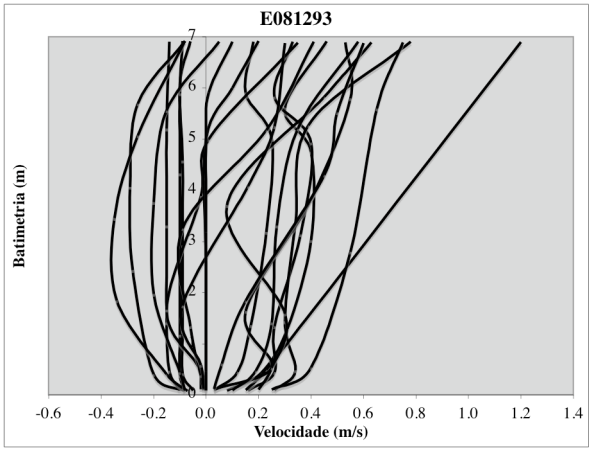
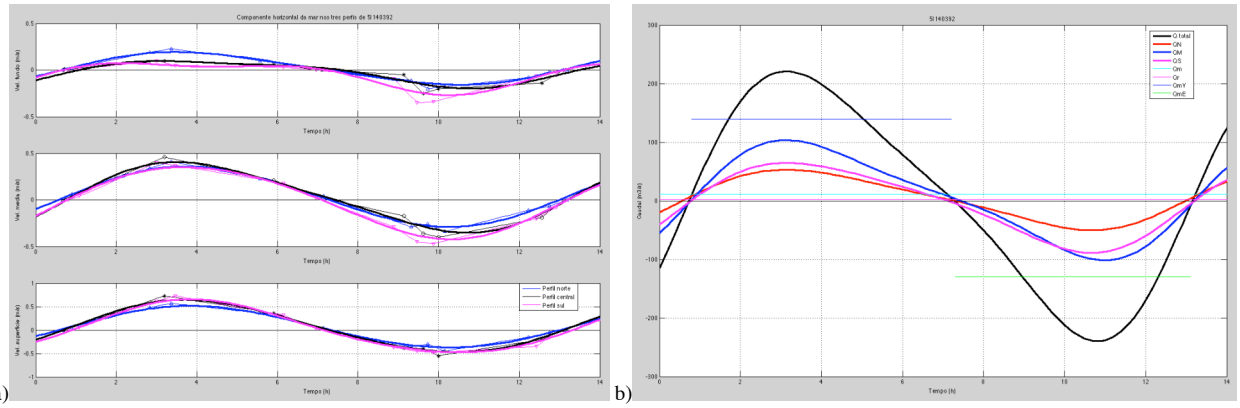


Figura 5.3.2. 2. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem E(S), E(M) e E(N) que definiram a estação da Embocadura. No gráfico a) representam-se os perfis correspondentes à série de dados E150392. Esta série foi composta por 36 perfis que decorreram sob $A_{w,E150392}\approx1.3m$ e $Q_{r,E150392}\approx37m^3/s$, ou sob $A_{w,IH}=2.1m$ e $Q_{r,APC}=5m^3/s$. No gráfico b) representam-se os perfis respeitantes à série de dados E81293, composta por 20 perfis, que decorreram sob $A_{w,IH}\approx1.6m$ e $Q_{r,APC}\approx82m^3/s$.

Da análise dos vários ciclos de maré estudados na estação dos Cinco Irmãos, foi possível definir vários padrões gerais de circulação das principais massas de água, que abrangeram quadros hidrodinâmicos de marés vivas e mortas e diversos regimes do Mondego. Desta forma, aquando de marés mortas e regimes fluviais pequenos, da ordem dos $Q_{r,5I}\leq28m^3/s$, verificou-se que a fase de enchente nesta estação se iniciou junto ao fundo pelo sector central do canal, uma vez que em 5I(M) foram registadas as primeiras estofas da BM, tal como se representa a título de exemplo no gráfico a) da figura 5.3.2. 3. Considerando como representativa deste quadro hidrodinâmico a série de dados 5I140392, da análise da referida figura, constata-se que o atraso registado da estofa da BM na coluna de água para além de ter sido mais elevado na superfície dos escoamentos, também tendeu a ser maior para o sector norte, pelo que reflectiu uma maior influência das descargas do Mondego na fase terminal da vazante por aquele sector. Acresceu o

facto de estes escoamentos também terem apresentado as menores densidades relativas da secção transversal. Durante toda a fase da enchente as velocidades tenderam a apresentar maiores magnitudes para o sector sul deste canal (figura 5.3.2. 3.a) levando a considerar que a maré se tenha feito sentir com maior intensidade por este sector do canal, uma vez que ali também se registaram as maiores amplitudes da constituinte da velocidade M_2, os maiores períodos de enchente, bem como, as maiores densidades relativas dos escoamentos na secção (figura 5.3.1.11). Por este sector sul do canal, também circularam durante a fase de aceleração da enchente os maiores volumes de água na secção, como se ilustra no gráfico b) da figura 5.3.2. 3, muito embora as secções molhadas definidas por 5I(S), 5I(M) e 5I(N) terem sido em média da ordem dos 186m^2, dos 251m^2 e dos 149m^2. Na fase de desaceleração os maiores volumes passaram a circular pelo sector central do canal. As velocidades máximas foram atingidas pouco depois de metade desta fase, por volta de 0.60 da enchente (às 10.63h), tendo ocorrido praticamente ao mesmo tempo na coluna de água, com atrasos da ordem das $\Delta t \approx 0.13$h e de apenas $\Delta t \approx 0.30$h na secção transversal. As magnitudes registadas foram da ordem dos $u_{max,E,b} \approx$ -0.21m/s para os escoamentos de fundo, de $\overline{u}_{max,E} \approx -0.37$m/s para os médios e de $u_{max,E,s} \approx -0.44$m/s para os escoamentos de superfície. A fase enchente culminou com a estofa da PM que teve lugar primeiramente à superfície na parte central do canal e foi caracterizada por um atraso de apenas $\Delta t_{EPM,y,s} \approx 0.10$h na secção transversal, e esteve associada à formação de uma frente esquematizada na figura 5.3.1.10. Na coluna de água, esta estofa apresentou um atraso igualmente pequeno, que foi da ordem das $\Delta t_{EPM,z} \approx 0.20$h. Junto ao fundo, a enchente prolongou-se mais para o sector sul deste canal, tendo sofrido um atraso relativamente a 5I(N) de $\Delta t_{EPM,y,b} \approx 0.30$h. Estes resultados indiciaram uma maior influência da maré pelo sector sul nesta fase final da enchente e o início da fase da vazante à superfície pelo sector central da estação 5I. A distribuição vertical da velocidade nesta fase da enchente foi definida por perfis com variações do tipo logaritmo, descrevendo gradientes muito elevados junto ao fundo, que tenderam a decrescer em direcção à

superfície, definindo uma camada limite de fundo que se estendeu por toda a coluna de água, como se ilustra no gráfico a) da figura 5.3.2. 4. Na fase final da enchente, verificou-se que nos 0.5m superficiais passou-se a registar um ligeiro abrandamento dos escoamentos em resultado do gradiente barotrópico gerado em sentido contrário pela massa de água do Mondego localizada algumas dezenas de metros a montante.



a) b)

Figura 5.3.2. 3. No gráfico a) ilustra-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem da estação dos Cinco Irmãos, na série 5I140392, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,5I}\approx 1.2$m e descargas do Mondego de $Q_{r,5I}\approx 3 m^3/s$. No gráfico b) expressam-se os caudais líquidos (expressos em m^3/s) que circularam neste ciclo de maré pelo sector norte (QN), central (QM), sul (QS) e que representaram secções molhadas médias de $149m^2$, de $251m^2$ e de $186m^2$, bem como os caudais que circularam por toda a secção transversal do canal (Q total). Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Qm), o caudal médio referente às descargas fluviais (Qr) e os caudais médios referentes às fases da enchente e a vazante (QmE; QmV).

Da análise do gráfico a) da figura 5.3.2. 3 verificou-se que as velocidades de maior magnitude da fase de vazante tiveram lugar nos escoamentos de fundo por volta das 2.93h (a 0.36 desta fase) com uma magnitude média no canal da ordem dos $u_{max,V,b}\approx +0.12$m/s. Nos escoamentos médios estas velocidades tiveram lugar às 3.47h (a 0.44 da vazante) com uma magnitude média de $\overline{u}_{max,V}\approx +0.39$m/s, e nos escoamentos de superfície aconteceram às 3.80h (a 0.47 da vazante) com uma magnitude de $u_{max,V,s}\approx +0.61$m/s. As magnitudes mais elevadas daquelas velocidades na secção transversal aconteceram no perfil norte. Por se terem registado no sector norte do canal as maiores magnitudes da velocidade, bem como os maiores períodos de vazante e as menores densidades relativas dos escoamentos da secção transversal, levou a considerar um domínio da vazante naquele sector. A análise da distribuição da velocidade na coluna de água durante a

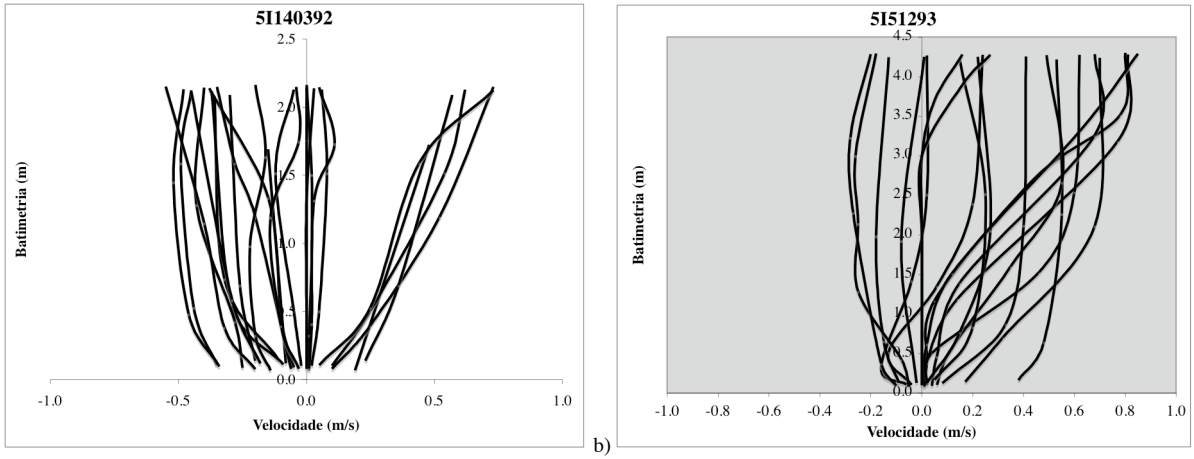
vazante, permitiu identificar que nas fases inicias e finais os escoamentos apresentaram perfis logaritmos, característicos de uma camada limite de fundo de acordo com Lueck & Lu (1997) e se representa no gráfico a) da figura 5.3.2. 4. Nas restantes fases da vazante desta série 5I140392, os perfis de velocidade deixaram de apresentar um carácter logaritmo, para passar a definir um gradiente muito elevado na velocidade, quase que linear, que se estendeu desde o fundo até à superfície, descrevendo uma camada limite de fundo bem pronunciada. Junto ao fundo as magnitudes das velocidades apresentadas foram muito pequenas, enquanto à superfície muito elevadas. Esta distribuição de velocidade na coluna de água foi representativa de uma distorção imposta quer pelo fundo do canal, quer pelas descargas fluviais, que nesta fase da maré, ambas definiram perfis de velocidade segundo o mesmo sentido, ou seja em direcção ao mar. Estes resultados apontam para que neste sector mais interior do canal principal, as descargas do Mondego tenham passado a ter uma maior importância relativa na sua hidrodinâmica (em detrimento da maré), tanto que aquelas apresentaram magnitudes muito pequenas, da ordem dos $Q_{r,5I140392} \approx 3 m^3/s$. Os perfis que ostentaram uma aceleração dos escoamentos nos 0.6m da superfície, localizaram-se no perfil 5I(N) e reflectiram uma drenagem preferencial de uma massa de água de mistura, que por ter apresentado uma menor densidade relativa na secção, poderá ter sido representativa da circulação preferencial do Mondego pelo sector norte do canal.

Comparadas as duas fases da maré neste sector que dista 7.5km da foz do estuário, verificou-se que os períodos de vazante foram ligeiramente superiores aos da enchente, tendo esta diferença sido tendencialmente mais elevada em direcção à superfície, com diferenças de tempo da ordem das $\Delta t_{T,b} \approx 0.39h$ junto ao fundo, das $\Delta t_{T,m} \approx 0.76h$ nos escoamentos médios e das $\Delta t_{T,b} \approx 1.17h$ na superfície. Os períodos de enchente mais elevados foram registados no perfil sul e os mais curtos no perfil norte. Quanto às magnitudes das velocidades de mais elevadas, verificou-se que junto ao fundo as de enchente foram superiores às de vazante enquanto nos escoamentos médios elas praticamente se igualaram em magnitude. Nos de superfície as magnitudes das

velocidades máximas de vazante foram superiores às da enchente, indiciando desta forma um domínio da maré junto ao fundo e traduzindo um domínio das correntes de vazante e dos caudais do Mondego à superfície.

Aquando de marés vivas, de que é exemplo a série 5I70392, para além de se ter verificado que a fase da enchente se iniciou pelo sector sul do canal, neste sector sul também foram registadas as maiores amplitudes da constituinte M_2, as velocidades de maior magnitude, os maiores períodos da enchente, bem como a massa de água de mistura com maior densidade relativa na secção transversal, pelo que se inferiu que a maré salina entrou preferencialmente pelo sector sul desta estação. Contudo, no final desta fase, junto ao fundo, os escoamentos de enchente prolongaram-se pelos sectores central e norte. Mesmo tendo decorrido sob descargas do Mondego um pouco superiores, da ordem dos $Q_{r,5I} \approx 43 m^3/s$, estes continuaram a definir velocidades e períodos de vazante superiores para o sector norte do canal. Também se passou a registar à superfície um incremento do atraso da estofa BM e uma tendência de antecipação da estofa da PM relativamente às correspondentes estofas dos escoamentos médios e de fundo, relacionados com a distorção fluvial. Os perfis de velocidade da fase de vazante passaram a definir uma fina camada de fundo ($\leq 0.5m$) definida por velocidades muito baixas e muito constantes na coluna de água. Sobre esta, os escoamentos passaram a apresentar um comportamento muito similar ao descrito anteriormente com a série 5I140392, definindo gradientes muito elevados da variação da velocidade na restante coluna de água com uma variação quase que linear.

Nas fases de maior altura da coluna de água aquando de marés com alturas superiores a $A_{w,5I} \geq 1.3m$ constatou-se uma drenagem para o braço norte de uma massa de água mais turva e menos salina proveniente do sector mais proximal do braço sul. Esta massa de água de mistura quando escoada no braço norte passou a ser arrastada para montante junto à margem esquerda durante a fase final da enchente na estação dos Cinco Irmãos.



a) b)

Figura 5.3.2. 4. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem 5I(S), 5I(M) e 5I(N) que constituem a estação dos Cinco Irmãos. No gráfico a) representam-se os perfis correspondentes à série de dados 5I140392. Esta série foi composta por 28 perfis que decorreram sob $A_{w,5I}\approx1.2$m e $Q_r\approx3m^3/s$, ou sob $A_{w,IH}=1.6$m e $Q_{r,APC}=5m^3/s$. No gráfico b) representam-se os perfis respeitantes à série de dados 5I51293, composta por 25 perfis, que decorreram sob $A_{w,IH}\approx2$m e $Q_{r,APC}\approx142m^3/s$.

Durante a fase inicial da vazante passou a ser encaminhada junto à margem esquerda do CP para jusante. Na interface das duas massas de água (a do CP e a proveniente do braço sul), formou-se uma frente que foi descrita no item 5.2.1. Aquando da inundação dos ambientes intermareais do sector mais proximal do braço sul, parte desta massa de água foi drenada para o canal principal pela confluência proximal dos dois braços, em resultado do gradiente formado na superfície livre entre ambos os canais definindo uma inclinação favorável ao segundo, nunca se verificando a entrada da massa de água de mistura do canal principal para o braço sul por este sector do estuário.

Com a regularização do braço norte[4] passou-se a registar uma alteração no quadro de circulação nesta estação, quer durante a enchente, quer durante a vazante, abrangendo quadros de marés vivas e mortas, bem como, de baixas a elevadas descargas do Mondego. A fase da enchente que passou a processar-se com mais vigor fundamentalmente pela parte central do canal, registando-se no perfil de amostragem 5I(M) as maiores amplitudes da constituinte da velocidade M_2, as maiores velocidades de enchente da secção transversal, dos períodos desta fase mais elevados e as maiores densidades relativas dos escoamentos. A fase de vazante também

[4]. De que são referencia as campanhas 5I80893, 5I141193 e 5I51293.

sofreu mudanças passando a dominar a parte central ou a parte norte do canal, uma vez que ali se passaram a registar as densidades mais baixas da secção, as maiores magnitudes da velocidade de vazante e os maiores períodos de vazante. Esta alteração do padrão de circulação nesta estação ter-se-á relacionado com a alteração da fisiografia do braço norte, confinando os escoamentos de enchente ao leito menor mais estreito, e consequentemente a entrada da maré pela parte central do canal. Com as obras de regularização do braço norte, na ligação proximal dos dois braços deixou de se registar a frente referenciada anteriormente.

Sob descargas fluviais elevadas, da ordem dos $109 \leq Q_{r,5l} \leq 142 m^3/s$, os fluxos de enchente foram caracterizados por uma variação da velocidade do tipo logaritmo, definindo uma camada limite de fundo na metade inferior dos escoamentos, como se ilustra no gráfico b) da figura 5.3.2. 4. Na restante metade dos escoamentos, o gradiente passou a definir um amortecimento da velocidade em direcção à superfície, em consequência da obstrução causada pela massa de água de mistura menos densa, que se encontrava ainda localizada a montante desta estação no canal principal, com um movimento segundo a vazante. A fase inicial da enchente foi caracterizada na coluna de água por um quadro típico de circulação estuarina de acordo com clássica Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e van Rijn (1994).

A fase da vazante pode ter sido caracterizada por dois tipos de escoamentos, representados nos perfis do gráfico b) da figura 5.3.2. 4. Um correspondente à fase de aceleração da vazante, e praticamente coincidente com a primeira metade desta fase, foi definida por distribuições verticais da velocidade muito complexas. Foi possível diferenciar uma camada de fundo, de espessura de 0.5-1m definida por velocidades muito pequenas e muito constantes na coluna de água. Seguiu-se-lhe uma parte do escoamento definida um gradiente muito elevado da velocidade, do tipo linear, que reflectiu um aumento considerável da velocidade na coluna de água e que representou a maior parte da altura dos escoamentos. Na parte superior de alguns destes escoamentos apresentaram nos últimos 0.5m uma velocidade muito elevada, mas com

distribuição muito constante na coluna de água. Esta estreita camada de superfície, com o evoluir da fase de vazante (na fase de desaceleração) tendeu a aumentar de espessura e a representar a maior parte dos escoamentos. Abaixo desta, a distribuição da velocidade foi caracterizada por um gradiente muito elevado (do tipo logaritmo) e a reflectir as forças de cizalhamento geradas pelo fundo. Nesta segunda metade da vazante, a fina camada de fundo de velocidade muito pequena (e que terá servido de interface entre o fundo e os escoamentos de vazante propriamente ditos) dissipou-se. Esta distribuição da velocidade em toda a coluna de água reflectiu uma camada limite de fundo relacionada quer com os fenómenos de amortecimento gerados no fundo do canal quer com o perfil de velocidades resultante das descargas do Mondego, que se somaram. Desta forma, quer na fase enchente, que na vazante os gradientes de velocidade apresentados pelos escoamentos foram representativos de uma variação da velocidade característica da distorção imposta quer pelo fundo, quer pelas descargas fluviais em toda a coluna de água, à semelhança do considerado por Lu *et al* (2000). Estas variações verticais na velocidade na coluna de água ter-se-ão traduzido numa forte turbulência interna, gerada entre diferentes camadas de água definidas por movimentos diferenciais, mas também em resultado de um hidrodinamismo elevado que face às reduzidas dimensões deste canal, como considerado por Geyer *et al* (2000) para o estuário do rio Hudson (USA) ou por Elliott *et al* (1990). Foram representativas deste quadro hidrodinâmico, as séries 5I141193, 5I51293 e 5I40295. À semelhança da estação da Embocadura, na estação dos Cinco Irmãos também se verificaram vários padrões de circulação das massas de água que para além de terem estado condicionados pela fisiografia do canal principal do estuário, estiveram muito condicionados com as magnitudes dos principais agentes hidrodinâmicos, a maré e as descargas do Mondego.

A análise dos resultados obtidos na estação Elevatória também permitiu identificar dois padrões de circulação, que abrangeram um leque de condições hidrodinâmicas representadas por marés compreendidas entre os $1.3<A_{w,EE}<1.9$m e caudais médios do Mondego $Q_{r,EE}<98 m^3/s$,

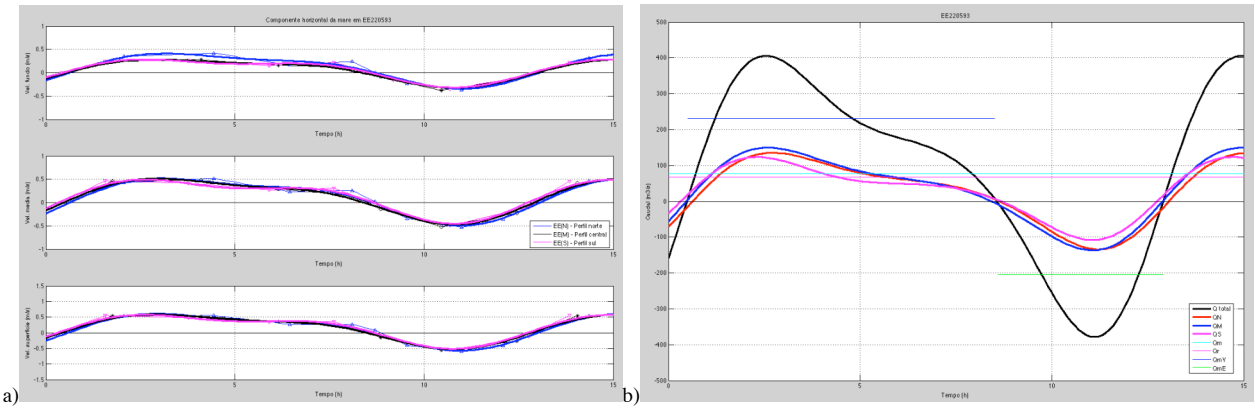
muito embora tenha sido reduzido o número de séries analisadas. O primeiro padrão, foi definido aquando de baixos a moderados regimes do Mondego, da ordem dos $Q_{r,EE} \leq 67 m^3/s$ e teve por base a análise das séries EE70893 e EE220593. Constatou-se que a fase da enchente teve início pelo sector norte deste canal enquanto o final da vazante se prolongou pelo sector sul, uma vez que a estofa da BM apresentou um atraso da ordem das 0.25h entre os perfis EE(N) para o EE(S), de acordo com o gráfico a) da figura 5.3.2. 5. Também se verificou ter havido um domínio da fase da enchente pelo sector norte desta estação, uma vez que se registaram de EE(S) para EE(N), aumentos relativos quer da magnitude da velocidade, quer dos períodos da enchente. As primeiras foram da ordem dos $u_{max,b,E} \approx -0.33 m/s$ para os escoamentos de fundo, de $u_{max,m,E} \approx -0.47 m/s$ para os médios e de $u_{max,s,E} \approx -0.54 m/s$ para os escoamentos de superfície, representativas de um gradiente na secção transversal de apenas $\Delta u_{max,m,E} \approx -0.05 m/s$ (figura 5.3.2. 5). Os períodos foram da ordem das 4.51h, das 4.29h e das 4.25h, respectivamente. Para o sector norte também se registou um aumento da amplitude da constituinte harmónica da velocidade M_2. Já o final da enchente prolongou-se mais pelo sector norte deste canal, tanto que a estofa da PM sofreu um atraso na secção da ordem das 0.18h entre o perfil EE(S) e o EE(N). Este atraso também determinou que a vazante se tenha iniciado pelo sector sul do canal. Da análise do gráfico b) da figura 5.3.2. 5 constatou-se que durante a fase de aceleração dos escoamentos da enchente, entraram pelo sector central os maiores volumes da secção transversal, enquanto na fase de desaceleração da vazante os maiores volumes relativos da secção passaram a circular pelo sector norte do canal. As áreas das secções molhadas dos três sectores desta estação, o sul, o central e o norte, foram em média da ordem dos $210 m^2$, dos $260 m^2$ e dos $234 m^2$.

Na fase da vazante, já se verificou um quadro de circulação diferente, uma vez que durante a maior parte desta fase o sector norte apresentou o maior hidrodinamismo da secção, com o registo do perfil EE(S) para o EE(N), de velocidades de corrente de vazante tendencialmente mais elevadas, e períodos de vazante mais elevados, tal como se representa no gráfico a) da

figura 5.3.2. 5. O facto de as fases inicial e final da vazante se terem prolongado pelo sector sul ter-se-á fundamentalmente relacionado com o domínio da curta fase da enchente pelo sector norte e consequentemente esta ter condicionado a primeira. Quando analisados os volumes que transitaram nesta fase da vazante, constatou-se que foram mais elevados no sector central deste canal (figura 5.3.2. 5.b). Também se verificou ter havido um claro domínio da fase da vazante relativamente à da enchente, ao apresentar períodos e velocidades de vazante muito superiores, que se reflectiu numa grande assimetria na componente horizontal da maré neste sector interior do estuário. Neste quadro hidrodinâmico, tanto a fase da enchente como a da vazante foi caracterizada por perfis verticais da velocidade com distribuições do tipo logaritmica, descrevendo um gradiente elevado junto ao fundo (nos primeiros 0.5m) seguido de um gradiente mais pequeno na restante parte do escoamento, de acordo com o gráfico a) da figura 5.3.2. 6. Definiu desta forma uma camada limite de fundo que se estendeu por toda a coluna de água. Nas fases de transição da maré, nas estofas da BM e da PM, toda a massa de água se deslocou praticamente em simultâneo em toda a coluna de água, evidenciando estas estofas atrasos máximos da ordem das $\Delta t_z \approx 0.10h$, permitindo enquadrar esta estação no sector dinâmico da maré, tanto que, foi sempre caracterizada por uma massa de água fluvial que sofreu apenas a acção dinâmica da maré. Neste sector norte do canal da estação Elevatória, também foram registadas as maiores amplitudes de variação da velocidade (e no EE(S) as mais pequenas da secção), pelo que indiciaram ter ali ocorrido o maior hidrodinamismo deste ciclo de maré. Estes padrões de circulação da massa de água fluvial registados em diferentes fases da maré, relacionaram-se com a interacção dos escoamentos com a fisiografia deste troço de canal regularizado do Baixo Mondego, cuja disposição longitudinal encurvada, foi responsável pela orientação dos escoamentos das duas fases da maré para o sector norte desta estação.

Com o aumento das descargas do Mondego para valores da ordem dos $Q_{r,EE151193} \approx 160 m^3/s$, passou-se a definir o segundo padrão de circulação nesta estação. Não se observou qualquer

drenagem preferencial dos escoamentos de enchente, registando-se velocidades muito similares nos três sectores do canal, com diferenças que não ultrapassaram os 0.02m/s.



a) b)

Figura 5.3.2. 5. No gráfico a) ilustra-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem da estação Elevatória de EE220593, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,EE}$≈1.8m e descargas do Mondego de $Q_{r,EE}$≈67m^3/s, ou sob $A_{w,IH}$≈2m e $Q_{r,APC}$≈14m^3/s. No gráfico b) expressam-se os caudais líquidos (expressos em m^3/s) que circularam neste ciclo de maré pelos sectores norte (QN), central (QM), sul (QS) que apresentaram secções molhadas médias respectivamente de 234m^2, de 260m^2 e de 210m^2, bem como os caudais que circularam por toda a secção transversal do canal (Q total). Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Qm), o caudal médio referente às descargas fluviais (Q_r) e os caudais médios referentes às fases da enchente e a vazante (QmE; QmV).

O mesmo se passou nos períodos de enchente que apresentaram diferenças na secção transversal de apenas 0.20h. Na fase da vazante passaram a ser assinaladas as maiores magnitudes da velocidade e os maiores volumes de vazante no sector central do canal, definindo diferenças de magnitudes na secção transversal da ordem dos 0.13m/s. Comparativamente ao contexto hidrodinâmico descrito anteriormente, agora sob elevados regimes fluviais acentuou-se a assimetria registada entre as duas fases da maré, verificando-se quer um aumento relativo dos períodos da vazante em detrimento dos da enchente, quer um aumento relativo das magnitudes das velocidades de vazante em prejuízo das de enchente. Tendo por base a série de dados 5I151193 considerada representativa de elevadas descargas fluviais na estação Elevatória, os períodos da vazante passaram a ser da ordem das 9.26h, das 9.21h, e das 9.21h respectivamente para os escoamentos de fundo, médios e de superfície, enquanto os da enchente passaram a ser da ordem das 3.26h, das 3.21h, e das 3.21h. Quanto às velocidades, as de vazante junto ao fundo foram da ordem dos +0.38m/s, nos escoamentos médios de +0.56m/s, e à superfície de +0.66m/s,

enquanto as de enchente foram da ordem das -0.17m/s, das -0.30m/s, e das -0.34m/s, respectivamente. A redução dos períodos e das magnitudes das velocidades da fase da enchente relacionou-se com o amortecimento gerado pelas descargas fluviais que se opuseram frontalmente à entrada da maré, exercendo uma força em sentido contrário à entrada da maré, não se registando qualquer tipo de circulação estuarina clássica, de acordo com o descrito por Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e van Rijn (1994). Analisados os vários perfis verticais da componente longitudinal da velocidade que compuseram esta série de dados, representados no gráfico b) da figura 5.3.2. 6, concluiu-se que os escoamentos nas duas fases da maré foram definidos por camadas limites de fundo que se estenderam por toda a altura do escoamento. Contudo, na fase da vazante, aquando das maiores velocidades, os respectivos perfis verticais passaram a reflectir um aumento considerável do gradiente da velocidade junto ao fundo que se restringiu também aos primeiros 0.5m, e que traduziu uma distribuição da velocidade relacionada com a adição quer do efeito dos fenómenos de amortecimento gerados no fundo do canal, quer do perfil de velocidades resultante das descargas do Mondego.

Na fase da enchente a distribuição da velocidade definiu um gradiente elevado de fundo que se estendeu por mais de metade do escoamento aquando das maiores magnitudes desta fase, reflectindo uma distribuição da velocidade em toda a coluna de água resultante do atrito gerado pelo fundo e pelo empurrar para montante da massa de água fluvial deste sector mais proximal do estuário. Estas variações elevadas da velocidade na coluna de água ter-se-ão traduzido numa forte turbulência interna, gerada entre diferentes camadas de água definidas por movimentos diferenciais, à semelhança do considerado por Trowbridge *et al* (1999) e Geyer *et al* (2000). Os perfis de velocidades registados nesta estação aquando das estofas da BM e da PM, mesmo sob estas descargas elevadas do Mondego foram caracterizados por variações de velocidade nulas em praticamente toda a coluna de água. O perfil de velocidades referente à fase inicial da enchente reflectiu a entrada da maré, com velocidades negativas junto ao fundo, de acordo com o gráfico

b) da figura 5.3.2. 6. Neste contexto de descargas fluviais elevadas, continuou a verificar-se nesta estação, a ocorrência de deslocamentos longitudinais da massa de água fluvial para montante e para jusante nas fases da enchente e da vazante, enquadrando-a no sector da maré dinâmica, e a definir uma hidrodinâmica fundamentalmente regulada pelas descargas do Mondego, à semelhança do considerado por exemplo por McCarthy *et al* (1991) para o sistema Okavongo fan de Botswana.

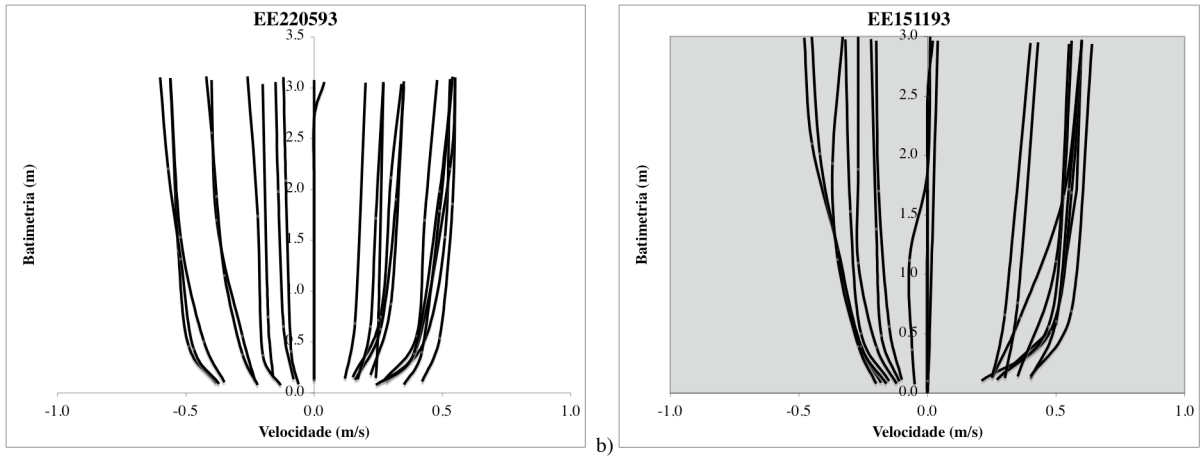


Figura 5.3.2. 6. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem EE(S), EE(M) e EE(N) da estação Elevatória. No gráfico a) expressam-se os perfis referentes à série de dados EE220593 que decorreu sob $A_{w,EE220593}$=1.8m e $Q_{r,EE220593}$=67m^3/s; ou sob $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=14m^3/s. No gráfico b) representam-se os perfis referentes à série de dados EE151193 que representaram condições de $A_{w,EE151193}$=1.5m e $Q_{r,EE151193}$=160m^3/s ou sob $A_{w,IH}$= 3.3m e $Q_{r,APC}$=98m^3/s.

Comparativamente à estação dos Cinco Irmãos, estes resultados apontaram para que tenha havido um aumento relativo da fase da vazante em detrimento da enchente, e para uma perda da importância relativa da maré em detrimento das descargas fluviais, na hidrodinâmica desta estação localizada muito perto da cabeça do estuário. Contudo, importa também mencionar que o pequeno número de séries de dados completas analisadas nesta estação poderão não representar toda a variabilidade natural das tendências de circulação desta estação do estuário, muito embora as tendências observadas tenham sido consentâneas com o comportamento hidrodinâmico esperado face à morfologia deste troço de canal estuarino.

A análise dos resultados obtidos nos dez ciclos de maré realizados na Gala permitiu identificar vários padrões de circulação das principais massas de água nesta estação, que foram

representativos de um leque de alturas de maré compreendidas entre os $0.9<A_{w,Gala}<2.5$m e de caudais médios do rio Pranto inferiores a $Q_{r,Gala}\leq 42m^3/s$. Durante a fase da enchente, a maré tendeu a entrar preferencialmente pelos sectores norte e central do canal. Sob marés de altura inferior a $A_{w,Gala}\leq 1.9m^3/s$ foram registadas no perfil G(N) as velocidades de maior magnitude da secção, enquanto para as marés de maior altura estas passaram a ser registadas no perfil central. Nestes sectores também foram registadas as maiores velocidades e os períodos de enchente mais elevados, bem como as maiores amplitudes da constituinte M_2 da velocidade, enquanto as menores magnitudes destes parâmetros ocorreram no perfil G(S). Para corroborar este domínio da maré, para o sector norte também foram sempre registadas as maiores densidades relativas dos escoamentos na secção. Tendo por exemplo a série G200593, as maiores magnitudes da velocidade de enchente tiveram lugar pouco depois da metade desta fase, a 0.58 (ou às 9.77h) com magnitudes médias que rondaram os -0.16m/s junto ao fundo, os -0.39m/s nos escoamentos médios e os -0.60m/s à superfície. Na secção transversal, as diferenças das velocidades médias rondaram apenas os 0.11m/s. A fase final da enchente prolongou-se pelo sector norte, registando-se no perfil G(N) os maiores atrasos da estofa da PM na secção, e a fase da vazante iniciou-se pelo sector sul. Na secção transversal desta estação, os maiores volumes de enchente também tenderam a circular pelo sector norte (gráfico b) da figura 5.3.2. 7), muito embora a diferença de magnitudes das secções molhadas médias definidas pelos três perfis G(S), G(M) e G(N) que foram respectivamente da ordem dos $193m^2$, dos $164m^2$, e dos $202m^2$. As distribuições verticais da velocidade desta fase, definiram uma camada limite de fundo que se estendeu por toda a coluna de água, que foi representativa de uma distorção fundamentalmente relacionada com o atrito gerado na interface escoamento/fundo (figura 5.3.2. 8).

Para quadros hidrodinâmicos definidos por marés de altura inferiores a $A_{w,Gala}<1.9$m e muito baixas descargas do Pranto, a fase da vazante nesta estação foi caracterizada pelo registo das maiores velocidades e de períodos elevados no perfil central.

a) b)

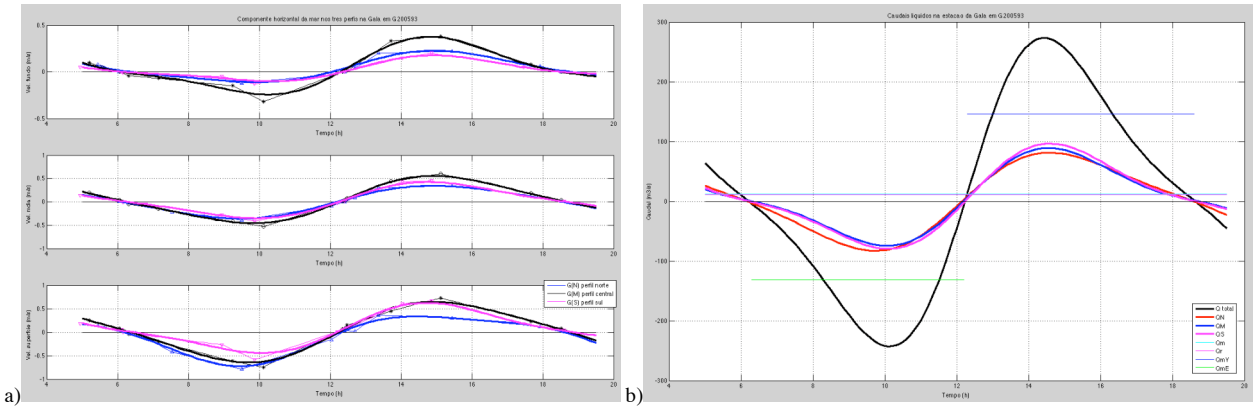


Figura 5.3.2. 7. No gráfico a) representa-se a variação temporal da velocidade da corrente junto ao fundo, na coluna de água e à superfície, nos três pontos de amostragem que definiram a estação Gala em G200593, que decorreu sob uma maré de altura $A_{w,Gala}\approx 2m$ e descargas do Pranto de $Q_{r,Gala}\approx 11m^3/s$. No gráfico b) ilustram-se os caudais líquidos (expressos m^3/s) que circularam neste ciclo de maré pelo sector norte (QN), central (QM), sul (QS) que apresentaram secções molhadas médias respectivamente de $202m^2$, de $164m^2$ e de $193m^2$, bem como os caudais que circularam por toda a secção transversal do canal (Q total). Representam-se igualmente o caudal médio do ciclo de maré (Qm), o caudal médio referente às descargas fluviais (Qr) e os caudais médios referentes às fases da enchente e da vazante (QmE; QmV).

No perfil G(S) ocorreram velocidades com magnitudes muito semelhantes, um pouco inferiores às anteriores, mas associadas aos maiores períodos da fase da vazante. Estes resultados permitiram associar uma drenagem preferencial dos escoamentos de vazante pelos sectores central e sul da estação da Gala. Contudo, sob marés vivas de altura superior a $A_{w,Gala}\geq 1.9m$ ou aquando de maiores descargas do Pranto, da ordem dos $20\leq Q_{r,Gala}\leq 46m^3/s$, foram sempre registadas no perfil G(M) as magnitudes mais elevadas das velocidades, os maiores períodos de vazante e os maiores volumes da massa de água que circulou por esta estação, pelo que indicaram uma drenagem preferencial dos escoamentos de vazante pela parte central do canal da Gala. A circulação das massas de água nesta estação esteve fundamentalmente regulada pela fisiografia dos sectores médio e distal do braço sul. O domínio da fase da vazante pela parte central e sul deste canal relacionou-se apenas com a fisiografia do sector médio do daquele braço, uma vez que os perfis G(M) e G(S) localizaram-se no enfiamento longitudinal do canal submareal de maior dimensão do sector distal do braço sul, flanqueando a margem esquerda daquele braço e a margem esquerda da grande barra intermareal longitudinal (figura 5.2.3), por onde foram drenados os principais volumes de água durante a fase da vazante. A circulação definida para a

fase da enchente foi fundamentalmente regulada pela fisiografia do sector distal do braço sul que ao ser definida por um troço de canal com um traçado longitudinal encurvado para sul orientou a entrada da maré para a margem direita do canal e consequentemente para o perfil G(N) da estação da Gala. A circulação das principais massas de água na estação da Gala também foi condicionada pela posição periférica deste canal relativamente à entrada principal da maré pelo canal principal, que lhe conferiu uma menor hidrodinâmica e um comportamento subalterno à hidrodinâmica do primeiro, tanto que aquando da fase final da enchente na estação da Embocadura (gráfico a) da figura 5.3.2. 1) verificou-se que o braço sul começou a vazar, sob a forma de uma fina massa de água superficial que escoou pelo sector sul da estação da Embocadura.

Aquando de marés vivas com alturas aproximadamente superiores a $A_{w,Gala} \geq 1.9m$ também foi observado nesta estação a formação de vários vórtices na superfície, acompanhados de uma deformação da superfície livre com uma forma de onda, que se formou em resultado da interacção dos escoamentos de vazante com o fundo. Este tipo de deformação da superfície adquiriu a forma de várias ondas estacionárias, estáticas no tempo, que por sua vez reflectiram grandes estruturas sedimentares que se formaram no fundo (Open University Course Team, 1989). Estas ondas estiveram associadas a escoamentos de vazante com velocidades muito elevadas e que resultaram do estreitamento sofrido pelo canal, entre os sectores médio e distal do braço sul, localizado poucos metros a montante desta estação (efeito de convergência). Tomando por exemplo a série de dados G200593, representada na figura 5.3.2. 7, verificou-se que os redemoinhos na superfície e as ondas estacionárias, começaram a ser observados durante a fase de aceleração dos escoamentos de vazante, entre as 13.37h e as 15.45h (ou entre as 17h15m e as 19h20m, hora local), tendo este efeito de convergência deixado de ser registado pouco depois da ocorrência das magnitudes máximas da velocidades de vazante. As magnitudes mais elevadas das velocidades desta fase tiveram lugar a 0.40 da vazante (pelas 14.87h), com magnitudes médias da

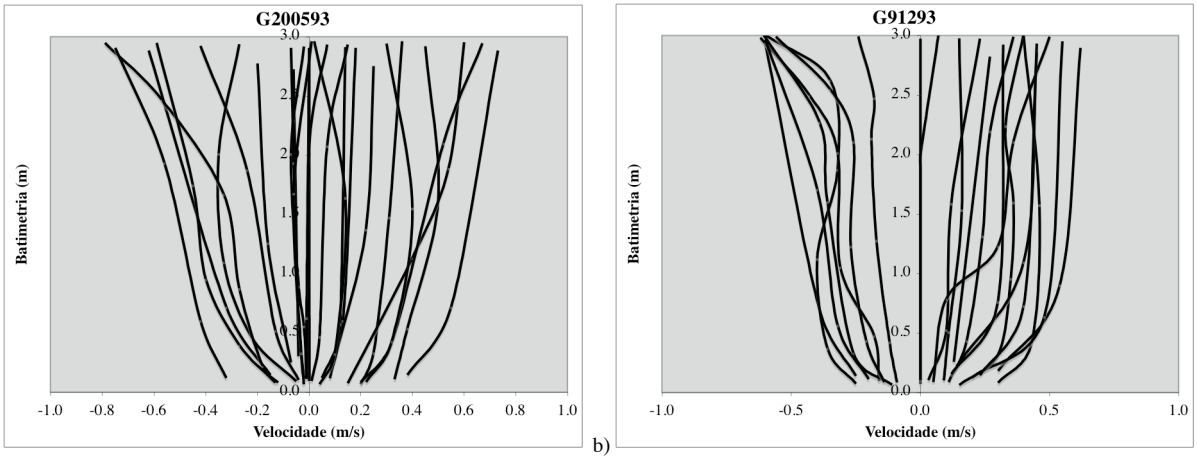
ordem dos +0.27m/s para os escoamentos de fundo, dos +0.43m/s para os médios, e dos +0.52m/s para os escoamentos de superfície (5.3.2. 7.a). Os gradientes transversais médios da velocidade foram da ordem dos 0.21m/s. As estofas da maré, da BM e da PM foram caracterizadas por atrasos que rondaram as $\Delta t_z \leq 0.10h$ na coluna de água e as $\Delta t_y \leq 0.13h$ na secção transversal, de acordo com o gráfico a) da figura 5.3.2. 8, enquanto sob marés de menor altura, de $A_{w,G110893} \approx 0.9m$, estes atrasos foram apenas de $\Delta t_z \approx 0.00h$ e de $\Delta t_y \leq 0.08h$. Aquando de descargas elevadas do Pranto, da ordem dos $Q_{r,G50392} \approx 46m^3/s$, os atrasos da estofa da BM rondaram as $\Delta t_z \approx 0.30h$ na coluna de água e as $\Delta t_y \approx 0.21h$ na secção transversal, enquanto a estofa da PM ostentou atrasos da ordem das $\Delta t_z \leq 0.06h$ na coluna de água e das $\Delta t_y \leq 0.32h$ na secção. Neste exemplo, os períodos de vazante foram da ordem das 6.19h junto ao fundo, das 6.28h para os escoamentos médios e das 6.37h à superfície.

Este sector do estuário foi caracterizado por uma ligeira assimetria da maré, fundamentada num ténue domínio da fase da vazante em detrimento da enchente, apenas para os escoamentos médios e à superfície, que se traduziu em períodos de vazante um pouco mais longos aos da enchente e por velocidades de vazante com magnitudes um pouco superiores, que no ciclo de maré G200593 foram respectivamente de $\Delta t_m \approx 0.13h$ e $\Delta t_s \approx 0.32h$ e de $\Delta u_m \approx 0.05m/s$. Junto ao fundo já se verificou ou ligeiro domínio da fase da enchente, com velocidades e períodos de enchente ligeiramente superiores aos da vazante (com $\Delta t_b \approx 0.08h$ e de $\Delta u_b \approx 0.05m/s$) e com velocidades médias para o ciclo de maré negativas de $\approx -0.01m/s$ igualmente favoráveis à enchente. Aquando das maiores descargas do Pranto ($Q_{r,G50392} \approx 46m^3/s$) passou-se a verificar um domínio da fase da vazante na coluna de água, com velocidades máximas com magnitudes superiores (em aproximadamente $\approx +0.15m/s$), bem como, com períodos de vazante mais elevados da ordem das $\Delta t_b \approx 0.17h$, $\Delta t_m \approx 0.57h$ e $\Delta t_s \approx 0.90h$ para os diferentes níveis batimétricos em análise. Neste sector do estuário, devido ao fenómeno de convergência gerado com o

afunilamento da secção do canal junto à ponte da Gala, as magnitudes das velocidades de vazante medidas na estação da Gala foram amplificadas. A distorção sofrida pela componente horizontal da maré induzida apenas pelas descargas do Pranto terá sido pequena, reflectindo-se praticamente em pequenos atrasos nas estofas da BM[5] na superfície dos escoamentos. Os extensos ambientes intermareais com vastas áreas de sapal localizados nos sectores médio-proximal (item 5.2.1) terão sido os principais responsáveis pela assimetria registada nos períodos das duas fases da maré, ao fomentarem o represamento de água durante a descida da maré e consequentemente prolongar a fase de vazante, à semelhança do descrito por Healey *et al* (1981); Speer & Aubrey (1985); Wang *et al* (1999b) e Blanton *et al* (2002) para sistemas estuarinos pouco profundos. Terá acrescido o facto de aquelas áreas terem representado mais de 70% da área do braço sul, a fase da enchente ter sofrido uma maior dissipação de energia relacionada com o atrito de fundo ao inundar e propagar naqueles ambientes intermareais.

A análise da variação da velocidade na coluna de água representada no gráfico a) da figura 5.3.2. 8, permitiu definir para os escoamentos de vazante uma camada limite de fundo que se estendeu por toda a coluna de água e que resultou da distorção induzida pelo fundo do canal. Em alguns destes perfis tornou-se evidente uma camada limite de superfície que resultou do atrito gerado pela acção de um vento moderado do quadrante norte que ao propagar-se em sentido contrário ao dos escoamentos, gerou também uma agitação de superfície durante grande parte da fase da vazante.

[5]. Uma vez que a abertura das comportas da Quinta do canal apenas se efectuaram durante a vazante e princípios da enchente.



a) b)

Figura 5.3.2. 8. Perfis da variação da componente horizontal da velocidade na coluna de água determinados nos três pontos de amostragem G(S), G(M) e G(N) que compuseram a estação da Gala. No gráfico a) expressam-se os 31 perfis que compuseram a série de dados G200593 que decorreu sob $A_{w,G200593}$=2m e $Q_{r,G200593}$=11m^3/s, ou sob $A_{w,IH}$=2.3m e $Q_{r,APC}$=7m^3/s. No gráfico b) representam-se os 27 perfis correspondentes à série de dados G91293 que representaram condições de $A_{w,G91293}$=1.7m e de $Q_{r,G91293}$=20m^3/s, ou de $A_{w,IH}$=2m e $Q_{r,APC}$=5m^3/s.

Aquando de descargas mais elevadas do Pranto, esta fase da vazante passou a definir velocidades de maiores magnitudes, mas também passou a exibir perfis de variação da velocidade descritos por um gradiente mais elevado junto ao fundo ($0 \leq z \leq 1$m) e mais pequeno na restante parte do escoamento, tal como se exemplifica com a série de dados G91293, cujos perfis verticais da velocidade se encontram representados no gráfico b) da figura 5.3.2. 8. Muitos destes perfis também ostentaram na parte superior, um aumento relativo na distribuição vertical da velocidade relacionado com as descargas do Pranto[6]. Na globalidade estes perfis reflectiram a adição quer de uma distribuição da velocidade característica de uma camada limite relacionada com o atrito de fundo quer de um perfil de velocidades fluvial relacionada com os caudais do rio Pranto.

5.3.2.2. Classificação dos Escoamentos

Análise da Turbulência

No âmbito deste trabalho, considerou-se que os principais mecanismos de indução de turbulência no estuário resultam fundamentalmente da interacção dos escoamentos com a topografia dos canais, com o cizalhamento vertical da velocidade, com a tensão de corte

[6]. Caracterizados por um decréscimo relativo da salinidade.

produzida pelo vento e pelas ondas internas, e de gravidade, tal como descrito por Miranda *et al* (2002) para sistemas estuarinos pouco profundos similares ao Mondego. Quantificou-se a turbulência gerada no estuário recorrendo ao número de Reynolds (R_e) que permitiu descrever o tipo de regime em função da razão entre o produto da velocidade ($\bar{u}$) pela profundidade média ($\bar{h}$), com a viscosidade cinemática (υ). Uma vez que estes parâmetros físicos medidos nos vários sectores do estuário, em diferentes fases da maré reflectiram condições locais, considerou-se que reproduziram as interacções locais entre os escoamentos e a fisiografia dos canais e as respectivas estruturas hidrodinâmicas. A análise da turbulência restringiu-se a este parâmetro uma vez que as leituras de velocidade fizeram-se apenas segundo a componente longitudinal.

Dos 630 perfis de parâmetros físicos analisados nas quatro estações do estuário constatou-se que todos os escoamentos apresentaram estruturas turbulentas, tendo a maioria destes apresentado magnitudes do número de Reynolds superiores a $R_e>10^5$, tal como se representa no gráfico da figura 5.3.2. 9. Um reduzido numero destes perfis, medidos em fases da maré muito próximas das estofas da PM e da BM apresentaram magnitudes de R_e compreendidas entre os $\approx 1x10^4<R_e<1x10^5$, representativas de regimes um pouco menos turbulentos, mas ainda muito superiores a $4x10^3$, limite de acordo com Lencastre & Franco (1992). Na estação da Embocadura, estes corresponderam apenas a 4 perfis verticais dos 151 analisados nos 9 ciclos de maré medidos nesta estação. Na estação dos Cinco Irmãos foram 16 (dos 161 analisados nos 8 ciclos de maré), enquanto na estação Elevatória contabilizou-se apenas um perfil nos 93 medidos nos 5 ciclos de maré. Na estação da Gala foram contabilizados 10 perfis nos 225 medidos ao longo dos 10 ciclos de maré.

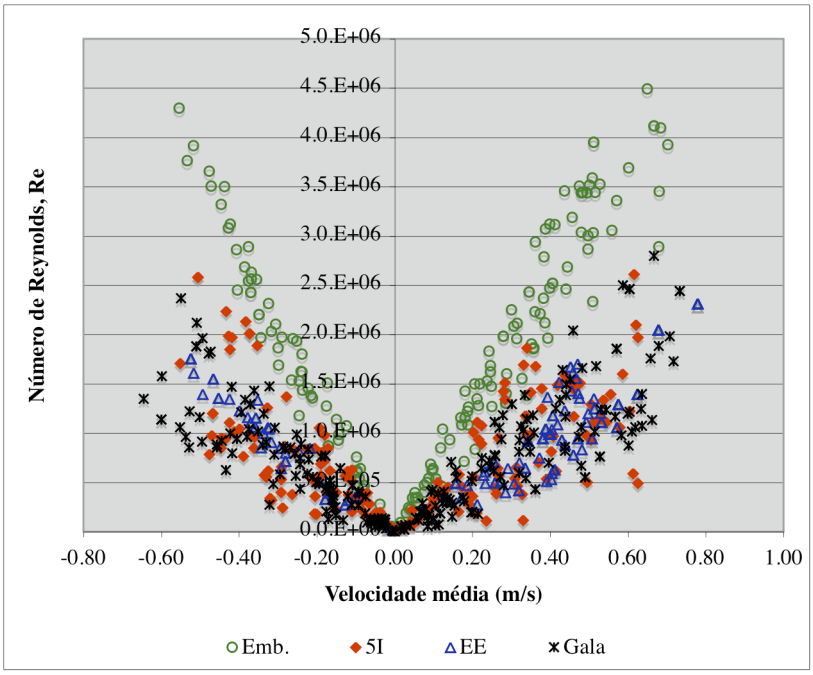


Figura 5.3.2. 9. Tendências de variação definidas entre o número Reynolds (R_e) e a velocidade média (u) dos diversos perfis de velocidade longitudinal medidos da coluna de água, nas quatro estações do estuário. Os resultados obtidos na estação da Embocadura foram referenciados na legenda por "Emb", nos cinco Irmãos por "5I", na estação Elevatória por "EE" e na Gala por "Gala". Verificou-se que em todo o estuário foram registados apenas regimes turbulentos, definidos por magnitudes de R_e tendencialmente mais elevadas sob escoamentos com maior velocidade. Com o aumento da velocidade os escoamentos tornam-se cada vez mais turbulentos.

A análise do gráfico da figura 5.3.2. 9 permitiu determinar que de entre os vários sectores do estuário em análise, na estação da Embocadura, registaram-se os maiores quadros de turbulência e consequentemente os maiores valores de R_e. Verificou-se igualmente que em todas as estações do estuário, as amplitudes de variação de R_e para as diferentes velocidades foram mais pequenas durante a fase da enchente, muito embora este fenómeno tenha sido mais evidente nas estações da Embocadura e Elevatória. Nestas duas estações quando comparadas as magnitudes de R_e registadas nas duas fases da maré, também se verificou ter havido uma maior turbulência durante a fase da enchente (entrada da maré). O registo de uma maior dispersão de valores de R_e para as diferentes velocidades estudadas durante a fase da vazante, ter-se-á relacionado com um maior leque de variação das magnitudes das velocidades médias aferidas em cada estação para os vários quadros de amplitude de maré e descargas fluviais estudadas, tanto que os perfis de velocidade gerados por cada um destes agentes se orientaram segundo o mesmo

sentido, em direcção ao mar e consequentemente adicionaram-se as suas magnitudes. Acresceu também o facto de na fase da vazante ter ocorrido uma maior variação da viscosidade cinemática (ν) na coluna de água, em resultado de um aumento da estratificação da densidade (item 5.3.1.2). A ocorrência de menores amplitudes de variação de R_e nas estações da Embocadura e Elevatória (comparativamente às restantes), registadas tanto na fase da enchente como na vazante, relacionou-se com a sua localização nas extremidades do estuário, respectivamente nos sectores marinho (ZC) e fluvial (ZF), e consequentemente com hidrodinâmicas dominadas quer pela maré, quer pelas descargas fluviais. Porém o registo de regimes de maior turbulência na Embocadura associou-se à hidrodinâmica mais elevada desta estação (itens 5.3.3 e 5.3.4), dominada pela maré. As maiores amplitudes de variação das magnitudes de R_e registadas nas estações dos Cinco irmãos e na Gala, reflectiram a sua localização nas zonas de mistura nos dois canais mais importantes do estuário, expressando maiores variações quer das velocidades médias, quer da viscosidade cinemática em resultado da competição ocorrida entre os principais agentes hidrodinâmicos e da complexidade dos fenómenos de mistura.

5.3.2.3. Tensões de Corte na Camada Limite de Fundo

De acordo com van Rijn (1989) e Soulsby (1997) as tensões de corte (τ_o) que se fizeram sentir no fundo dos canais de um estuário, por uma questão de simplicidade, podem ser convertidas em unidades de velocidade, recorrendo à relação biunívoca $\tau_o=\rho \cdot u_*^2$. Para tal, determinou-se a velocidade de corte de fundo (u_*) e o coeficiente de rugosidade (z_o) tendo por base as três medições de velocidade executadas mais próximo do fundo (a z=0.1m, a z=0.5m e a z=1.5m), de cada perfil efectuado nas várias estações do estuário.

Com a finalidade de estudar a camada limite de fundo, recorreu-se ao número de Reynolds de fronteira (R_{e*}), tendo-se constatado que todos os escoamentos estudados no estuário apresentaram estruturas turbulentas, com magnitudes de R_{e*} muito superiores a 70. Estes resultados, para além de terem definido quadros de turbulência muito elevados junto ao fundo, do

tipo turbulento rugoso (de acordo com Yalin, 1977), determinaram perfis de velocidade da corrente na camada limite de fundo independentes da viscosidade do fluido (ν). Esta terá sido composta por uma sub-camada logaritmica que se desenvolveu junto ao substrato detrítico do canal e delimitada superiormente por uma sub-camada externa que poderá ter representado cerca de 80% a 90% da espessura de toda a camada limite de fundo, segundo Yalin (1977), Falconer (1985), van Rijn (1989) e Soulsby (1997). A espessura destas sub-camadas, de acordo com os referidos autores, tende a diminuir sob condições de maior velocidade, e acima da camada limite de fundo pode desenvolver-se uma camada de escoamento livre, caracterizada por uma variação da velocidade muito constante da coluna de água. Os resultados obtidos no estuário, contudo, apontaram para que a camada limite de fundo dos diferentes escoamentos em análise se tenham estendido por toda a coluna de água, ao terem sido registados gradientes de velocidade com distribuições logaritmicas ou quase logaritmicas em toda a altura do escoamento, verificando-se mesmo coincidência de resultados entre as velocidades médias integradas na coluna de água com as velocidades médias estimadas pelo modelo de Yalin (1977). Foram excepção, os casos já referenciados anteriormente, cujos perfis mostraram ter sofrido superiormente uma aceleração ou desaceleração, quer em resultado do atrito gerado pela acção do vento, quer pela distorção de origem fluvial.

No gráfico da figura 5.3.2. 10 encontram-se relacionadas as magnitudes das velocidades de corte de fundo (u_*) com as velocidades médias integradas na coluna de água ($\overline{u}$) para os múltiplos perfis, aferidos nas quatro estações do estuário, considerando a relação existente entre a lei da tensão quadrática ($\tau_o=\rho \cdot C_d \cdot \overline{u}^2$) e a tensão de corte de fundo ($\tau_o=\rho \cdot u_*^2$). Desta forma e à semelhança de Lueck & Lu (1997) foi possível definir tendências de variação directas e proporcionais entre $(u_*)^2$ e $(\overline{u})^2$ para os vários sectores do estuário, fundamentadas em regressões lineares positivas significativas, apresentadas na legenda daquela figura, considerando $u_*^2=C_d \cdot \overline{u}^2$. Definiram tensões de corte tendencialmente mais elevadas sob escoamentos com maior

velocidade para as duas fases da maré, e os declives destas regressões descreveram os coeficientes de tracção (C_d).

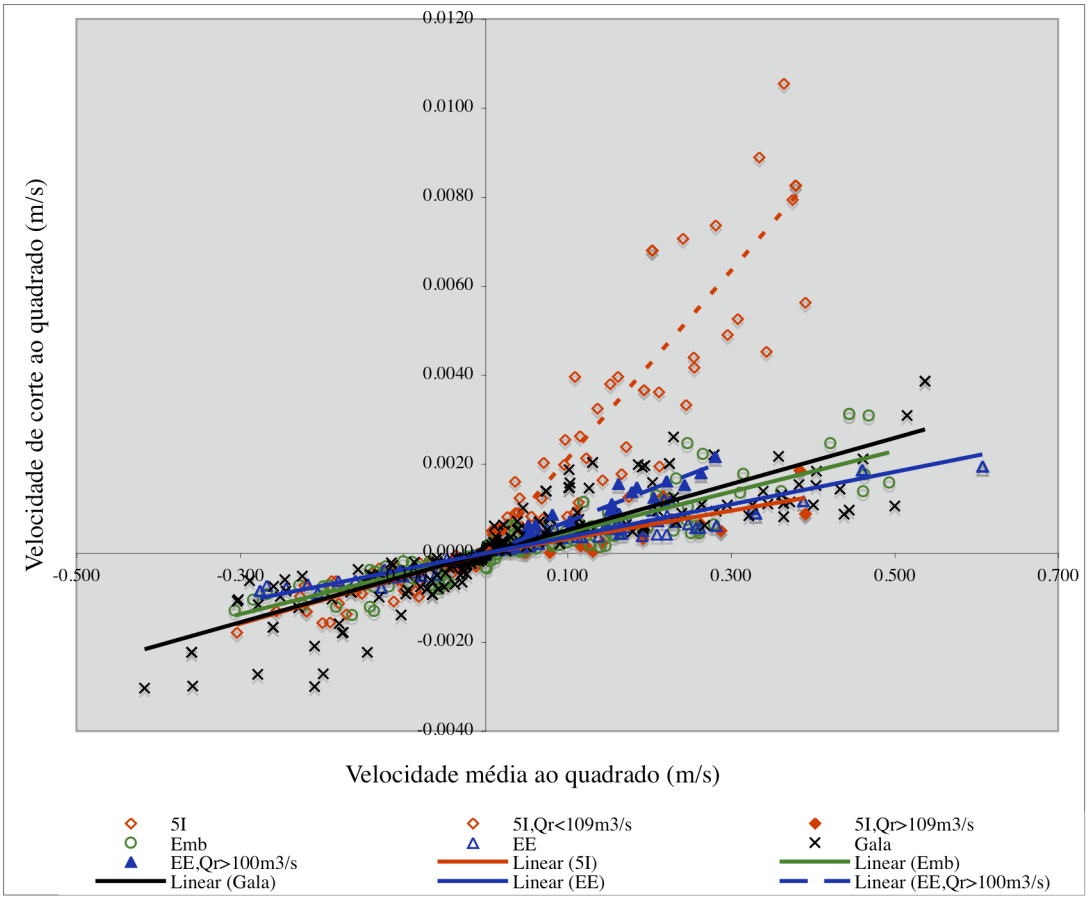


Figura 5.3.2. 10. Tendências de variação definidas entre a velocidade de corte de fundo (u_*) e a velocidade média (u) dos vários perfis de velocidade integrados na coluna de água, registadas nas quatros estações do estuário do Mondego. As variações da velocidade de corte nas diversa estações foram definidas pelas seguintes regressões: na Embocadura por $(u_{*,Emb})^2=0.0046*(\overline{u}_{Emb})^2$, $r=0.90$, $r^2=0.81$, $p<0.01$, $N_{Emb}=206$, na Elevatória por $(u_{*,EE})^2=0.0037*(\overline{u}_{EE})^2$, $r=0.92$, $r^2=0.95$, $p<0.01$, $N_{EE}=175$. Sob descargas do Mondego elevadas na fase de vazante passou a ser definida por $(u_{*,EE,Qr>100m3/s})^2=0.0071*(\overline{u}_{EE})^2$, $r=0.88$, $r^2=0.94$, $p<0.01$, $N_{EE}=24$. Na Gala, para a enchente por $(u_{*,Gala})^2=0.0063*(\overline{u}_{Gala})^2$, $r=0.80$, $r^2=0.64$, $p<0.01$, $N_{Gala}=130$, e para a vazante por $(u_{*,Gala})^2=0.0048*(\overline{u}_{Gala})^2$, $r=0.65$, $r^2=0.42$, $p<0.01$, $N_{Gala}=174$. Na estação dos Cinco Irmãos para a fase da enchente: $(u_{*e,5I})^2=0.0053*(\overline{u}_{5I})^2$, $r=0.91$, $r^2=0.82$, $p<0.01$, $N_{5I,e}=100$. Enquanto para a fase da vazante sob descargas do Mondego baixas por: $(u_{*,5I,v,Qr<109m3/s})^2=0.0212*(\overline{u}_{5I})^2$, $r=0.82$, $r^2=0.91$, $p<0.01$, $N_{5I,Qr<109m3/s}=39$. Sob descargas mais elevadas foi descrita por: $(u_{*,5I,v,Qr>109m3/s})^2=0.0032*(\overline{u}_{5I})^2$, $r=0.59$, $r^2=0.77$, $p<0.01$, $N_{5I,Qr>109m3/s}=75$. As regressões obtidas definiram tensões de corte de fundo tendencialmente mais elevadas sob escoamentos de maior velocidade.

Analisada apenas a fase da enchente, constatou-se que as tensões de corte geradas junto ao fundo, nas quatro estações, descreveram tendências de variação semelhantes entre si, e directamente proporcionais ao aumento da velocidade dos escoamentos. As amplitudes de variação de u_*^2 apresentadas nas quatro estações, foram também muito semelhantes entre si para

as diferentes magnitudes de $\overline{u}^2$ em análise, tendo sido reflexo da variabilidade geográfica e temporal das condições hidrodinâmicas dos escoamentos, das variações na natureza e granulometria do substrato, das formas de fundo e do transporte sedimentar, à semelhança do proposto por Falconer (1985), van Rijn (1989), Lueck & Lu (1996) e Soulsby (1997). De acordo com estes autores, este tipo de escoamentos turbulentos rugosos, têm lugar sob fundos formados por material detrítico arenoso ou mais grosseiro, atapetado com formas de fundo e associados ao transporte sedimentar, que lhe conferem rugosidades de fundo mais elevadas. Foram definidas, à semelhança de Lueck & Lu (1997) regressões lineares para os vários sectores do estuário entre u_*^2 e $\overline{u}^2$ (figura 5.3.2. 10), tendo estas sido praticamente coincidentes, reflectindo de uma forma qualitativa as variações das tensões de corte geradas nos escoamentos pelo fundo, com a entrada da maré no estuário, como também as magnitudes médias do Coeficiente de tracção. Desta forma, foi possível constatar que as magnitudes apresentadas pelo Coeficiente de tracção na fase de enchente apresentaram um leque de variação de $0.0037 \leq C_{d,e} \leq 0.0063$, tendo sido registadas as menores na estação Elevatória, seguidas na Embocadura, Cinco Irmãos e por fim, as mais elevadas na Gala, com $C_{d,e,EE} \approx 0.0037$; $C_{d,e,Emb} \approx 0.0047$; $C_{d,e,5I} \approx 0.0053$ e $C_{d,e,Gala} \approx 0.0063$. As magnitudes de $C_{d,e,5I}$ mais elevadas às de $C_{d,e,Emb}$ ter-se-ão relacionado com a localização da estação dos Cinco Irmãos num sector mais interno do estuário definido pelo limite superior da zona de mistura, onde as descargas fluviais impedem a penetração da maré salina e onde se verifica um aumento das tensões de fundo (Godin, 1999).

Analisadas as velocidades de corte de fundo geradas na fase da vazante, verificou-se que (e à semelhança da fase de enchente), as tensões de corte medidas nas várias estações ($\tau_o = \rho \cdot u_*^2$) descreveram tendências de variação directas e proporcionais à velocidade dos escoamentos ($\overline{u}^2$), tendo-se mesmo verificado que em algumas daquelas, as regressões foram iguais (foi o caso das estações Elevatória e Embocadura que apresentaram $C_{d,v,EE,Qr<100m3/s} \approx 0.0037$ e $C_{d,v,Emb} \approx 0.0047$). Aquando de descargas elevadas do Mondego, da ordem dos $Q_r > 100 m^3/s$, verificou-se na estação

Elevatória que as tensões geradas junto ao fundo aumentaram consideravelmente, passando a relação $u_*^2=C_d \cdot \overline{u}^2$ a definir também um aumento do Coeficiente de atrito que passou a ser da ordem dos $C_{d,v,EE,Qr>100m3/s}\approx 0.0071$. Este aumento relativo do coeficiente de atrito e da tensão de corte relacionou-se com o incremento das velocidades de vazante causado pelos elevados caudais do Mondego, que se reflectiu num aumento das tensões geradas no fundo face à pequena altura da coluna de água ($\overline{h}_{EE}\approx 2.9m$) e à batimetria longitudinal muito regular apresentada por este troço de canal do LRBM.

Porém, na estação dos Cinco Irmãos, durante a fase de vazante, registou-se um comportamento distinto, com a identificação de duas tendências de variação de $(u_*)^2$ com $(\overline{u})^2$, que por sua vez também foram diferentes da tendência registada na fase da enchente. Uma delas, correspondeu às velocidades de corte de fundo medidas em ciclos de maré que decorreram sob baixas descargas do Mondego, pelo menos inferiores a $Q_{r,5I}<109m^3/s$, e que definiram magnitudes de $(u_*)^2$ muito superiores às registadas nas restantes estações para as mesmas velocidades médias. Mostraram ter havido um maior gradiente da velocidade junto ao substrato detrítico na camada limite durante a fase da vazante, em resultado de um maior atrito gerado pelo fundo, tal como se expôs nos perfis de velocidade da figura 5.3.2. 4. Este aumento considerável de τ_o e de $C_{d,5I,Qr<109m3/s}$, quer relativamente à fase da vazante (sob descargas elevadas do Mondego), quer relativamente à fase da enchente, quer relativamente às outras estações do estuário, ter-se-á relacionado com uma maior rugosidade do fundo, associada por exemplo à formação de estruturas sedimentares de fundo de maior porte durante a fase de vazante, ou também a eventuais fenómenos de convergência associados à localização desta estação num sector onde ocorreu um ligeiro estrangulamento longitudinal da secção do canal (ver quadro 2.1 e figura 5.2.4).

Aquando de descargas do Mondego mais elevadas, da ordem dos $Q_{r,5I}>109m^3/s$, na fase da vazante passou-se a registar nesta estação, tensões de corte de fundo e magnitudes de $C_{d,5I}$ mais

pequenas, quer relativamente à mesma fase (sob $Q_{r,5I}<109m^3/s$), quer relativamente à fase da enchente, quer também relativamente à mesma fase nas restantes estações do estuário. Este quadro, reflectiu a ocorrência de gradientes verticais da velocidade muito pequenos junto ao fundo, que se confinaram a uma estreita sub-camada que se movimentou em sentido de vazante, mas com uma velocidade muito pequena. Esta sub-camada serviu de interface (comportando-se como uma sub-camada de amortecimento) entre o fundo e a maior parte do escoamento de vazante que apresentava velocidades muito superiores, e foi anteriormente identificada no item anterior, no gráfico b) da figura 5.3.2. 4. A formação desta sub-camada relacionou-se com a localização desta estação numa depressão topográfica, que passa a constituir uma zona de sombra hidrodinâmica aquando de elevadas descargas fluviais.

Na estação da Gala, o registo de magnitudes de $C_{d,e,Gala}$ superiores aos de $C_{d,v,Gala}$, reflectiu ter havido uma maior dissipação da energia pela acção do fundo durante a fase da enchente, que se relacionou fundamentalmente com a formação de megarriples e pequenas dunas com cristas de enchente[7] observadas aquando da estofa da PM, enquanto na estofa da BM, aquelas passaram a apresentar formas características de se terem formado aquando da vazante.

Quadro 5.3.2. 1. Coeficientes de atrito determinados para as quatro estações do estuário.

Estações	**Fase da enchente**	**Fase da vazante**
Embocadura (Emb)	$(u_{*,Emb})^2=0.0047*(\overline{u}_{Emb})^2 \Rightarrow C_{d,e,Emb}\approx 0.0047$	$(u_{*,Emb})^2=0.0047*(\overline{u}_{Emb})2 \Rightarrow Cd_{,v,Emb}\approx 0.0047$
Cinco Irmãos (5I)	$(u_{*e,5I})^2=0.0053*(\overline{u}_{5I})^2 \Rightarrow \mathbf{C_{d,e,5I}}\approx 0.0053$	$(u_{*,5I,v,Qr<109m3/s})^2=0.0212*(\overline{u}_{5I})^2 \Rightarrow \mathbf{C_{d,e,5I,v,Qr<109m3/s}}\approx 0.0212$ $(u_{*,5I,v,Qr>109m3/s})^2=0.0032*(\overline{u}_{5I})^2 \Rightarrow \mathbf{C_{d,e,5I,v,Qr>109m3/s}}\approx 0.0032$
Elevatória (EE)	$(u_{*,EE})^2=0.0037*(\overline{u}_{EE})^2 \Rightarrow \mathbf{C_{d,e,EE}}\approx 0.0037$	$(u_{*,EE,Qr<100m3/s})^2=0.0037*(\overline{u}_{EE})^2 \Rightarrow C_{d,v,EE,Qr<100m3/s}\approx 0.0037$ $(u_{*,EE,Qr>100m3/s})^2=0.0071*(\overline{u}_{EE})^2 \Rightarrow C_{d,v,EE,Qr>100m3/s}\approx 0.0071$
Gala (G)	$(u_{*,Gala})^2=0.0063*(\overline{u}_{Gala})^2 \Rightarrow \mathbf{C_{d,e,Gala}}\approx 0.0063$	$(u_{*,Gala})^2=0.0048*(\overline{u}_{Gala})^2 \Rightarrow C_{d,v,Gsla}\approx 0.0048$

Por não ter sido possível fazer medições da velocidade do vento aquando das campanhas de campo, não se determinaram as tensões de corte associadas à camada limite de superfície e sua implicação na circulação estuarina, tal como procedeu para a Ria de Aveiro Dias *et al* (1996); Dias *et al* (1998) e Dias *et al* (2000).

[7]. Estruturas sedimentares observadas com recurso a mergulho em apneia.

5.3.3. Parâmetros Maregráficos

Apresentação do Esquema de Análise dos Dados Hidrodinâmicos

Neste item pretendeu-se expor as tendências de variação ocorridas entre os parâmetros maregráficos calculados pela análise harmónica e as magnitudes dos principais agentes intervenientes na hidrodinâmica dos diferentes sectores do estuário. Para tal, foram testadas regressões simples ou múltiplas acontecidas entre todos os parâmetros maregráficos determinados para os diferentes ciclos de maré, nas estações do estuário, com as variações de magnitude da altura da maré, com as variações dos caudais fluviais e com a variação de parâmetros relacionados com a dinâmica e com a fisiografia do estuário. Contudo, foram apresentadas apenas algumas das regressões boas a muito boas obtidas com vários destes parâmetros maregráficos, nomeadamente com os períodos de enchente e de vazante, com as velocidades máximas da enchente e da vazante, e com as amplitudes de variação da velocidade, uma vez que os restantes parâmetros encontravam-se directamente relacionados com os primeiros e também corroboraram as mesmas tendências de variação. Os não discutidos corresponderam às amplitudes das constituintes M_2 e M_4 referentes à velocidade, aos períodos residuais da maré, e às ocorrências das estofas da PM e da BM. Também foram obtidas regressões boas com outros parâmetros fisiográficos abrangidos pelas variáveis independentes, mas que por terem estado directamente relacionados com P/V_{BM}, não foram apresentados. Estes consistiram no perímetro molhado de cada estação, da secção molhada, e da largura de superfície. O mesmo se passou com as amplitudes das constituintes M_2 e M_4 referentes à variação da superfície livre que também corroboraram as mesmas tendências de variação de A_w.

As regressões seleccionadas nos itens em epígrafe, numa primeira fase são apreciadas quanto ao tipo de relações ocorridas entre os vários parâmetros maregráficos e as magnitudes dos principais agentes hidrodinâmicos, seguidas de uma descrição e análise dos resultados obtidos graficamente, quer para cada uma das estações, quer na definição de eventuais tendências de variação longitudinais aos dois canais principais do estuário.

5.3.3.1. Relações Entre os Erros Cometidos

Os erros cometidos com a aplicação da análise harmónica (Rss) representados pela raiz quadrada dos desvios ocorridos entre os dados hidrográficos recolhidos no estuário e os resultados teóricos obtidos com a aplicação do modelo harmónico, definiram tendências de variação com os principais agentes hidrodinâmicos em análise. Os erros referentes à variação da superfície livre (Rss_η) e à variação da velocidade (Rss_u) para os diferentes ciclos de maré, descreveram correlações positivas muito boas, quer com a altura da maré em todas as estações do estuário, quer com os caudais fluviais apenas para as estações do canal principal (figura 5.3.3. 1).

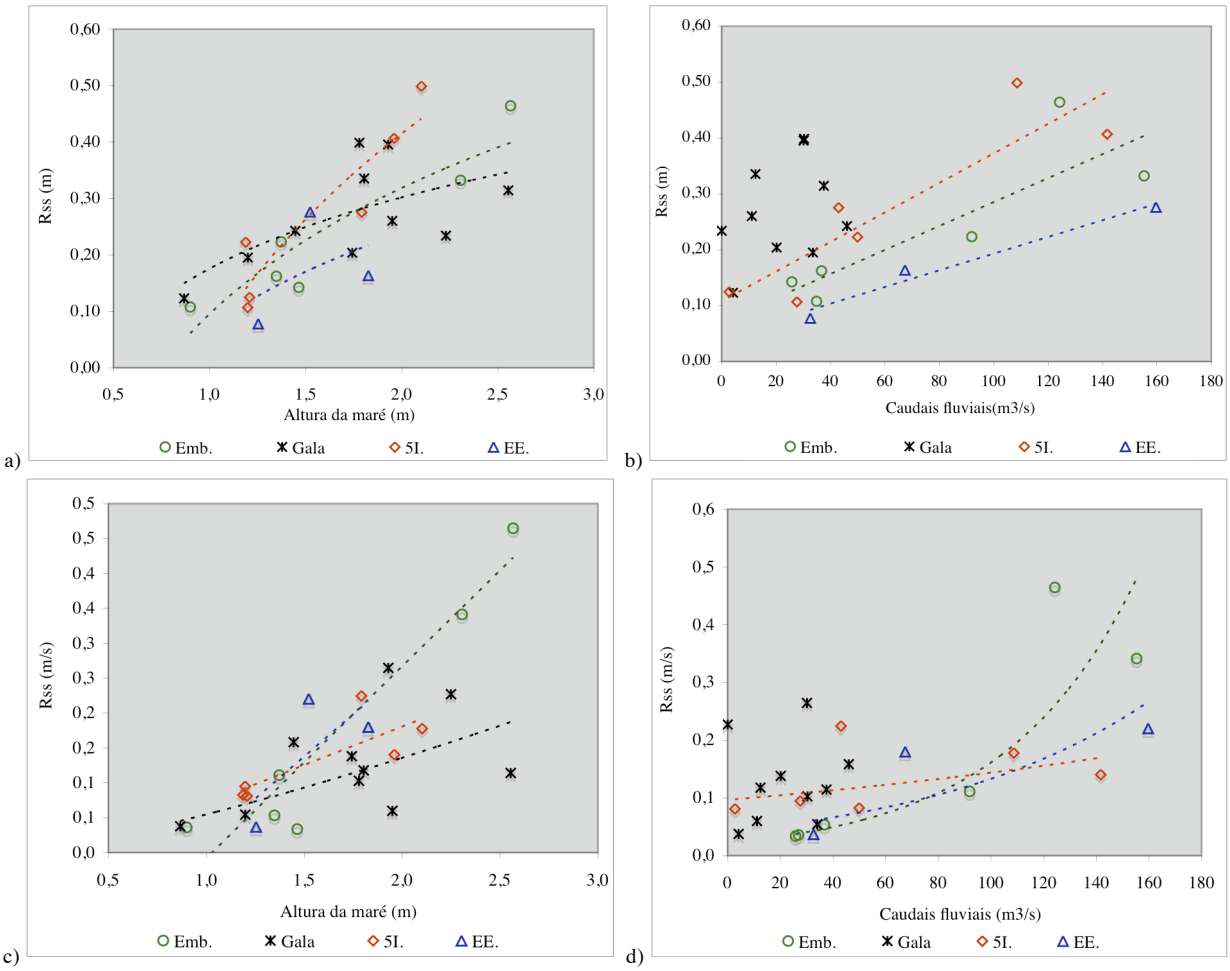


Figura 5.3.3. 1. Erros cometidos com a aplicação da análise harmónica aos dados maregráficos de campo linearmente interpolados (Rss): a) tendências de variação registadas entre os erros cometidos relativos à variação da superfície livre (Rss_η) e a amplitude da maré; b) tendências de variação registadas entre Rss_η e os caudais fluviais médios (Q_r); c) relação entre os erros cometidos relativos à componente horizontal (Rss_u) e a altura da maré; d) relação entre Rss_u e Q_r.

Desta forma realçaram que os maiores afastamentos ocorridos entre os valores preditos pela análise e os observados estiveram relacionados com condições hidrodinâmicas mais vigorosas, ou seja, associados a quadros de maior distorção dos escoamentos. Na estação da Gala, a ausência de qualquer tendência de variação de Rss_{Gala} com $Q_{r,Gala}$, quer para a variação da superfície livre, quer da componente horizontal da maré, apontou para que os caudais do Pranto tenham tido uma importância relativa pequena na hidrodinâmica desta estação.

5.3.3.2. Períodos de Enchente

Quando relacionadas as durações dos períodos de enchente (P_e) com a variação da altura da maré (A_w) registaram-se correlações muito boas, negativas e significativas nas estações da Embocadura e Cinco Irmãos descritas pelas funções 5.3. 2 e 5.3. 3, como se ilustra no gráfico a) da figura 5.3.3. 2. Considerando apenas os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais pequenos (Q_r<50m^3/s) nestas duas estações, continuaram a registar-se correlações negativas, muito boas de P_e com A_w, apenas significativas na Embocadura, e a descrever em ambas, períodos de enchente ligeiramente superiores aos anteriores e variações de P_e muito semelhantes entre si, dado ter-se minimizado o efeito de redução de P_e induzido pelos caudais do Mondego. Neste quadro dinâmico, estes períodos passaram a ser estimados na Embocadura pela equação 5.3. 1, definindo enchentes progressivamente mais curtas sob marés de maior amplitude, fundamentalmente associadas a um aumento da distorção pelo atrito de fundo (Duarte *et al*, 2000). Comparados estes períodos com os registados na estação do braço sul[1], verificou-se que os da Embocadura apresentaram magnitudes ligeiramente superiores e uma variação muito semelhante aos registados na Gala, explicados pela maior proximidade relativa daquela estação, à foz do estuário. Na Gala, os períodos de enchente apresentaram-se tendencialmente mais curtos sob marés de maior amplitude, fundamentados numa correlação negativa, boa, mas não significativa, de $P_{e,Gala}$ com $A_{w,Gala}$. Estes foram justificados pela

[1]. Uma vez que os caudais do Pranto registados na Gala foram semelhantes aos da Embocadura, com $Q_{r,Gala}$≤46m^3/s e $Q_{r,Emb}$≤37m^3/s.

deformação sofrida pelos escoamentos ao propagarem-se neste canal pouco profundo e de fisiografia complexa.

$$P_{e,Emb} = -0.2358 * A_{w,Emb} + 6.2411 \text{ (para } Qr \leq 37 m^3/s) \quad (5.3.1)$$

$$P_{e,Emb} = -0.7652 * A_{w,Emb} + 6.731 \text{ (para } Qr \leq 155 m^3/s) \quad (5.3.2)$$

$$P_{e,5I} = -1.3059 * A_{w,5I} + 7.0933 \text{ (para } Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s) \quad (5.3.3)$$

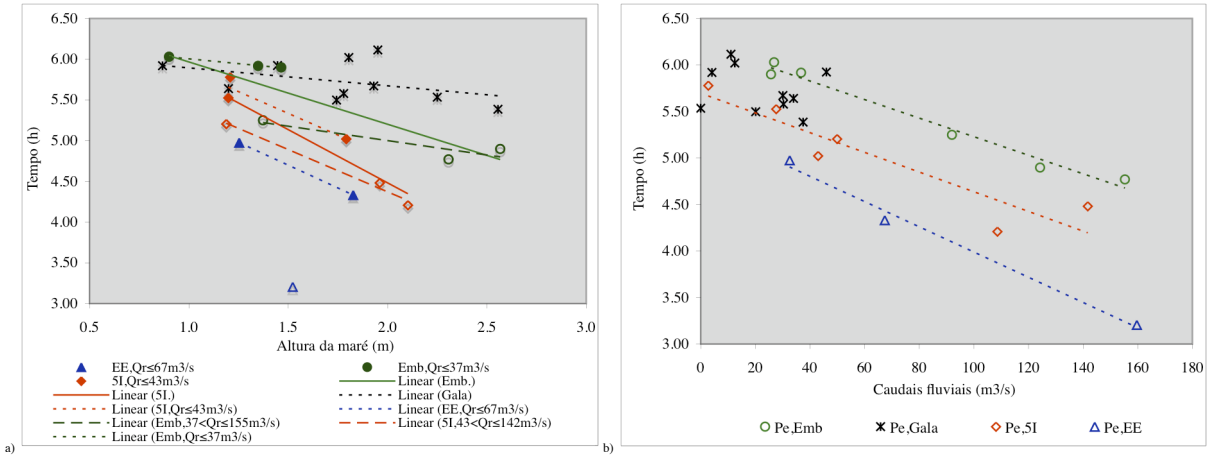


Figura 5.3.3. 2. Tendências de variação definidas ente os períodos de enchente (P_e) e os principais agentes hidrodinâmicos em estudo, para as diferentes estações do estuário. No gráfico a) relacionaram-se os P_e com a altura da maré (A_w). Foram definidas as seguintes regressões: $P_{e,Emb,Qr\leq155m3/s} = -0.7652*A_{w,Emb}+6.731$ com $r^2_{Emb,Aw}=0.76$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; $P_{e,Emb,Qr\leq37m3/s} = -0.2358*A_{w,Emb}+6.2411$ com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.99$, $p<0.05$, $N_{Emb}=3$; $P_{e,5I,Qr\leq142m3/s} = -1.3059*A_{w,5I}+7.0933$ com $r^2_{5I,Aw}=0.85$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$; $P_{e,Gala,Qr\leq42m3/s}=-0.2203*A_{w,Gala}+6.1147$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.19$, $r_{Gala,Aw}=-0.44$, $N_{Gala}=10$. No gráfico b) relacionaram-se os P_e com as descargas fluviais (Q_r). Definiram-se as seguintes regressões: $P_{e,Emb,Qr\leq155m3/s}=-0.01*Q_{r,Emb}+6.2282$ com $r^2_{Emb,Aw}=0.98$, $r_{Emb,Aw}=-0.989$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $P_{e,5I,Qr\leq142m3/s}=-0.0106*Q_{r,5I}+5.6967$ com $r^2_{5I,Aw}=0.85$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$; $P_{e,EE,Qr\leq155m3/s}=-0.0136*Q_{r,5I}+5.3466$ com $r^2_{5I,Aw}=0.99$, $r_{5I,Aw}=-0.995$, $p<0.05$, $N_{5I}=3$. Na legenda, $P_{e,Emb}$, $P_{e,Gala}$, $P_{e,5I}$ e $P_{e,EE}$ representaram os períodos de enchente aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória, enquanto $P_{e,Emb,Qr\leq37m3/s}$ e $P_{e,5I,Qr\leq43m3/s}$ referem-se aos ciclos de maré regidos por caudais fluviais inferiores a $37m^3/s$ e a $43m^3/s$, respectivamente. Os períodos de enchente tenderem a ser mais curtos, quer sob marés de maior amplitude, quer sob maiores descargas fluviais. Os testes de Durbin-Watson $1.6<t_{DW}<2.5$ aludiram para a independência destas variáveis.

Na globalidade, estes resultados apontaram para um decréscimo dos $P_{e,y}$ para o interior dos dois braços do estuário, com variações de $P_{e,y}$ muito similares ocorridas entre as estações Embocadura-Cinco Irmãos e a Embocadura-Gala, quer se tenha ou não considerado os ciclos de maré sujeitos a caudais do Mondego elevados ($Q_r>50m^3/s$). Na Estação Elevatória, e à semelhança das restantes estações do canal principal do estuário, só se obteve uma tendência de variação inversa entre $P_{e,EE}$ com $A_{w,EE}$ quando analisados apenas os ciclos de marés regidos por baixos caudais do Mondego, que para este sector mais distante da foz, foram de magnitudes da ordem dos $Q_{r,EE}\leq67m^3/s$. Estes dois ciclos permitiram igualmente, realçar períodos de enchente ainda mais reduzidos aos ocorridos em $P_{e,5I}$, mas com idêntica tendência de variação com A_w, face ao

paralelismo registado entre os declives das respectivas rectas de regressão, expressas na figura 5.3.3. 2.

Os períodos de enchente, quando relacionados com os caudais fluviais, demonstraram correlações muito boas, negativas, apenas para as estações do canal principal do estuário como se representam no gráfico b) da figura 5.3.3. 2, tendo sido somente significativas nas estações da Embocadura e Cinco irmãos de acordo com as expressões 5.3. 4 e 5.3. 5.

$$P_{e,Emb} = -0.01 * Q_{r,Emb} + 6.2282 \quad (\text{para } Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \qquad (5.3.4)$$

$$P_{e,5I} = -0.0106 * Q_{r,5I} + 5.6967 \quad (\text{para } Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s) \qquad (5.3.5)$$

Estas relações descreveram períodos de enchente tendencialmente mais curtos para o interior do estuário e variações dos mesmos com Q_r muito semelhantes nas três estações em análise, de acordo com o gráfico b) da figura 5.3.3. 2. Estas tendências de variação de P_e terão reproduzido a distorção sofrida por esta componente da maré, principalmente relacionada com a distorção fluvial. Na estação da Gala não se registou qualquer tendência de variação de $P_{e,Gala}$ com $A_{w,Gala}$ pelo que se considerou uma importância relativa pequena na duração desta componente da maré por parte dos caudais do Pranto. Na Estação Elevatória, uma vez que 99% da variabilidade de $P_{e,EE}$ foi explicada por $Q_{r,EE}$ (com $r^2_{EE,Qr}$=0.99) e não se verificou qualquer tendência de variação de $P_{e,EE}$ com $A_{w,EE}$, levou a presumir-se um domínio da duração destes períodos neste sector mais interior do estuário, pelas magnitudes dos caudais do Mondego.

Estes resultados apontaram para que aquando de caudais fluviais pequenos na Embocadura, inferiores a 37m^3/s, 99% da variabilidade dos $P_{e,Emb}$ foi explicada pela variação da altura da maré. Sob regimes fluviais mais elevados verificou-se que a duração dos períodos de enchente nesta estação passou a estar particularmente condicionada pelos regimes do Mondego, uma vez que 98% da variabilidade dos $P_{e,Emb}$ foi explicada pelos $Q_{r,Emb}$ através da recta de regressão 5.3. 4, e somente 76% daquela foi explicada por $A_{w,Emb}$ pela equação 5.3. 2. Comportamento similar foi registado na estação do Cinco Irmãos, com 98% da variabilidade de $P_{e,5I}$ ter sido explicada por $A_{w,5I}$ sob caudais fluviais inferiores a 43m^3/s. Sob maiores regimes do Mondego ($Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s$), verificou-se que os

caudais fluviais e a altura da maré passaram ambos a descrever 85% da variabilidade de $P_{e,5I}$. Na estação mais distante da foz do estuário, os resultados obtidos apontaram para que a variação de $P_{e,EE}$ tenha sido fundamentalmente condicionada pelos caudais do Mondego, fundamentada num ajustamento de ≈99% ($r^2_{EE,Qr}$=0.99). Na estação da Gala, apenas 19% da variabilidade dos $P_{e,Gala}$ foi explicada por $A_{w,Gala}$, sugerindo que a fisiografia do braço sul tenha condicionado a duração destes períodos, tais como, a presença de vastas zonas intermareais com áreas de sapal, as barras intermareais, entre outras.

$$P_{e,Emb} = 6.339\text{-}0.118*A_{w,Emb}\text{-}0.009*Q_{r,Emb} \quad (\text{para } 0.9 \le A_{w,Emb} \le 2.6\text{m e } Q_{r,Emb} \le 155\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.6)$$

$$P_{e,5I} = 6.524\text{-}7.13*A_{w,5I}\text{-}0.06*Q_{r,5I} \quad (\text{para } 1.2 \le A_{w,5I} \le 2.1\text{m e } Q_{r,5I} \le 142\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.7)$$

Tendo por finalidade expressar a variação de P_e para as estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos em função simultânea de A_w e de Q_r, determinaram-se as respectivas regressões múltiplas, tendo-se obtido funções lineares negativas, significativas descritas pelas equações 5.3. 6e 5.3. 7, respectivamente com $r^2_{Emb,Qr,Aw}$=0.98, $r_{Emb,Qr,Aw}$=-0.97, p<0.01, N_{Emb}=6 e com $r^2_{5I,Qr,Aw}$=0.93, $r_{5I,Qr,Aw}$=-0.88, p<0.05, N_{5I}=6.

5.3.3.3. Períodos de Vazante

Relacionados os períodos de vazante com os caudais fluviais, obtiveram-se correlações positivas, muito boas e significativas para as estações do canal principal do estuário (equações 5.3. 8, 5.3. 9 e 5.3. 10). Descreveram-se períodos de vazante tendencialmente mais longos para o interior do estuário, com variações muito semelhantes nas três estações, de acordo com o gráfico b) da figura 5.3.3. 3. Na Gala não se registou qualquer tendência de variação de $P_{v,Gala}$ com os caudais do Pranto.

$$P_{v,Emb} = 0.0097 * Q_{r,Emb} + 6.2335 \quad (\text{para } 0.9 \le A_{w,Emb} \le 2.6\text{m e } Q_{r,Emb} \le 155\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.8)$$

$$P_{v,5I} = 0.0107 * Q_{r,5I} + 6.7028 \quad (\text{para } 1.2 \le A_{w,5I} \le 2.1\text{m e } Q_{r,5I} \le 142\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.9)$$

$$P_{v,EE} = 0.0134 * Q_{r,EE} + 7.0914 \quad (\text{para } 1.2 \le A_{w,EE} \le 1.8\text{m e } Q_{r,EE} \le 160\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.10)$$

A duração dos períodos de vazante descreveu correlações positivas, significativas com A_w apenas nas duas estações mais distais do canal principal do estuário, determinadas pelas funções 5.3. 11 e 5.3. 12 de acordo com a figura 5.3.3. 3.b. Na estação da Gala obteve-se apenas uma tendência de variação, enquanto na Estação Elevatória não se registou qualquer interdependência.

$$P_{v,Emb} = 0.7278 * A_{w,Emb} + 5.7677 \quad (\text{para } Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \qquad (5.3.\ 11)$$

$$P_{v,5I} = 1.2539 * A_{w,5I} + 5.3958 \quad (\text{para } Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s) \qquad (5.3.\ 12)$$

Considerando apenas os ciclos de maré regidos por baixos caudais do Mondego ($Q_r<50m^3/s$) nas estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos, verificou-se que os períodos da vazante continuaram a descrever correlações positivas muito boas mas não significativas, com magnitudes de P_v inferiores às precedentes, em resultado de se ter minimizado o efeito de prolongamento destas fases pelos caudais fluviais (figura 5.3.3. 3.a). Comparados estes períodos de vazante da Embocadura com os registados na Gala, observou-se que os da segunda estação apresentaram magnitudes relativas um pouco superiores, bem como, traduziram vazantes relativas tendencialmente mais longas sob marés de maior amplitude. Estas terão resultado quer da maior distorção sofrida pela componente horizontal da maré ao propagar-se neste canal pouco profundo, quer com o aumento da retenção de água nos extensos ambientes intermareais que abrangem o sector médio proximal do braço sul.

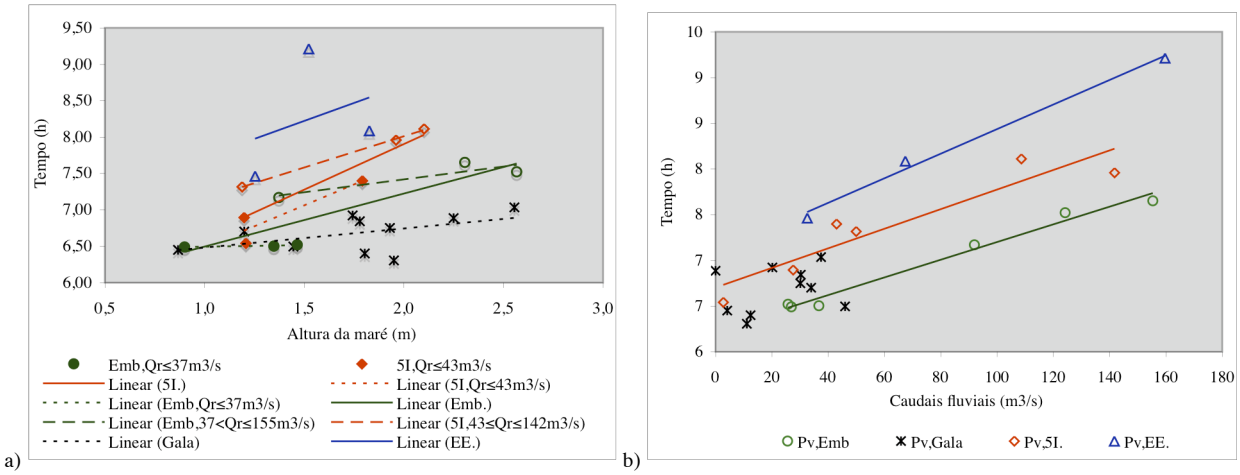


Figura 5.3.3. 3. Tendências de variação definidas ente os períodos de vazante (P_v) e os principais agentes hidrodinâmicos em estudo, para as quatro estações do estuário. No gráfico a) relacionaram-se os P_v com a altura da maré (A_w), tendo-se obtido as seguintes regressões: $P_{v,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.7278*A_{w,Emb}+5.7677$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.74$, $r_{Emb,Aw}=0.86$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; $P_{v,Emb,37<Qr\leq155m3/s}= 0.3533*A_{w,Emb}+6.7118$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.80$, $r_{Emb,Aw}=0.89$, $N_{Emb}=3$; $P_{v,5I,Qr\leq142m3/s}= 1.2539*A_{w,5I}+5.3958$, com $r^2_{5I,Aw}=0.78$, $r_{5I,Aw}=0.88$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$; $P_{v,5I,43<Qr\leq142m3/s}= 0.8599*A_{w,5I}+6.2947$, com $r^2_{5I,Aw}=0.998$, $r_{5I,Aw}=0.999$, $p<0.05$, $N_{5I}=4$; $P_{v,5I,Qr\leq43m3/s}= 1.1487*A_{w,5I}+5.3377$, com $r^2_{5I,Aw}=0.82$, $r_{5I,Aw}=0.91$, $N_{5I}=3$; $P_{v,EE,Qr\leq160m3/s}=0.9859*A_{w,EE}+6.7427$, com $r^2_{5I,Aw}=0.10$, $N_{EE}=3$; $P_{v,Gala,Qr\leq46m3/s}= 0.2613*A_{w,gala}+6.2947$, com $r^2_{Gala,Aw}=0.26$, $r_{Gala,Aw}=0.51$, $N_{Gala}=10$. No gráfico b) projectaram-se as regressões definidas entre P_v e as magnitudes dos caudais fluviais (Q_r), tendo-se obtido as seguintes regressões: $P_{v,Emb}= 0.0097*Q_{r,Emb}+6.2335$, para $r^2_{Emb,Qr}=0.98$, $r_{Emb,Qr}=0.99$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; $P_{v,5I}= 0.0107*Q_{r,5I}+6.7028$, para $r^2_{5I,Qr}=0.87$, $r_{5I,Qr}=0.93$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$; $P_{v,EE}=0.0134*Q_{r,EE}+7.0914$, para $r^2_{EE,Qr}= 0.99$, $r_{EE,Qr}=0.99$, $p<0.05$, $N_{EE}=3$. Na legenda, Emb, Gala, 5I e EE representaram os períodos aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória considerando todos os ciclos de maré estudados, enquanto Emb,$Q_r<37m^3/s$ e 5I,$Q_r<43m^3/s$ representaram apenas os ciclos de maré regidos por caudais fluviais inferiores a $37m^3/s$ e a $43m^3/s$, respectivamente. Os

períodos de vazante tenderam a ser mais elevados, quer sob marés de maior amplitude, quer descargas fluviais.

A assimetria registada entre as tendências de variação de P_v nestas duas estações, foi também corroborada pelas observações de campo efectuadas nas duas conexões dos braços norte e sul, onde se assinalaram também várias frentes dinâmicas. Na conexão distal destes braços, assinalaram-se várias frentes dinâmicas relacionadas quer com as fases finais da vazante onde os caudais drenados pelo braço norte apresentaram magnitudes relativas muito superiores e consequentemente barraram parcialmente a saída dos escoamentos provenientes do braço sul (figuras 5.3.1.14.d; 5.3.1.17.a; 5.3.1.20; 5.3.1.43), quer com as frentes geradas nas fases iniciais da enchente onde a massa de água marinha ascendente ao propagar-se ao longo do canal da embocadura impeliu para montante os escoamentos de vazante provenientes do braço sul (figura 5.3.1.14.c). As frentes que se formaram na conexão proximal destes braços também corroboraram estes resultados, uma vez que aquando do final da enchente, na estação dos Cinco Irmãos os escoamentos provenientes do braço sul foram impelidos para montante junto à margem esquerda deste braço, e no início da vazante do braço norte, foram arrastados para jusante de acordo com a figura 5.3.1.18. Contudo, estes escoamentos lançados para o braço norte já representavam a fase de vazante do braço sul, tendo sido canalizados por um pequeno esteiro intermareal drenante de extensas áreas intermareais do sector proximal do braço sul.

Estes resultados apontaram para que os períodos de vazante nas estações da Embocadura e Cinco Irmãos tenham sido principalmente regulados pela magnitude dos caudais fluviais para regimes fluviais de $Q_r \leq 160 m^3/s$, uma vez que cerca de 98% da variabilidade de $P_{v,Emb}$ e 87% da variabilidade de $P_{v,5I}$ foram explicados por Q_r, contra apenas 74% explicados por $A_{w,Emb}$ e 78% por $A_{w,5I}$. Sob regimes fluviais mais pequenos, da ordem dos $Q_r < 50 m^3/s$, a importância relativa da maré na duração destes períodos aumentou para valores da ordem de 82% descritos por $A_{w,Emb,Qr \leq 37 m^3/s}$ e 78% por $A_{w,5I,Qr \leq 43 m^3/s}$. Na estação Elevatória os resultados apontaram para que 99% variabilidade de $P_{v,EE}$ tenha sido explicada por $Q_{r,EE}$, e consequentemente traduzido um domínio dos caudais do

Mondego na duração desta fase descendente da maré, neste sector localizado na cabeça do estuário. Na estação do Braço sul, $P_{v,Gala}$ apenas se relacionou com $A_{w,Gala}$, com um ajuste pequeno de $r^2_{Gala,Aw}$=0.26, indiciando desta forma uma pequena importância relativa da maré na duração desta fase, que terá sido principalmente regulada pela fisiografia deste braço.

Tendo por finalidade poder estimar os períodos de vazante na estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos com o conhecimento simultâneo de A_w e de Q_r, testaram-se as respectivas regressões lineares múltiplas, que se revelaram significativas e explicadas pelas rectas de regressão 5.3. 13 e 5.3. 14.

$$P_{v,Emb} = 6.164+0.009*Q_{r,Emb}+0.072*A_{w,Emb} \quad (\text{para } 0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6\text{m e } Q_{r,Emb} \leq 155\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.\ 13)$$

$$P_{v,5I} = 6.093+0.07*Q_{r,5I}+0.525*A_{w,5I} \quad (\text{para } 1.2 \leq A_{w,5I} \leq 2.1\text{m e } Q_{r,5I} \leq 142\text{m}^3\text{/s}) \qquad (5.3.\ 14)$$

Em todas as estações do estuário, a duração dos períodos de vazante foram superiores às de enchente tendo descrito períodos residuais positivos destas fases, que tenderam a aumentar para os sectores mais interiores do estuário, bem como, a apresentar uma variação directa e proporcional com A_w e com Q_r. Na Gala os períodos residuais da maré ($P_{r,Gala}=P_{v,Gala}-P_{e,Gala}$) foram da ordem das $0.19<P_{r,Gala}<1.65$h, traduzindo períodos de vazante pouco mais longos que os de enchente, mas de menor magnitude que os registados nas restantes estações do canal principal do estuário, dado que estes foram sujeitos a uma acção distorciva mais elevada por parte dos caudais do Mondego que apresentam em média uma magnitude 10 vezes superior à do rio Pranto, de acordo com Baptista *et al*. (1995). Esta assimetria, acontecida nos períodos destas fases na estação da Gala, ter-se-á relacionado com a distorção da componente horizontal da maré ao propagar-se neste braço muito pouco profundo, bem como, com a distorção resultante da retenção de água nos extensos ambientes intermareais (Blanton & Andrade 2001). Com uma menor importância relativa, ter-se-á também relacionado com os caudais do rio Pranto, principalmente aquando dos regimes mais elevados.

5.3.3.4. Velocidades Máximas da Enchente

Após o estudo dos períodos de maré, pretendeu-se também relacionar as magnitudes das velocidades máximas e as respectivas ocorrências temporais nas fases da enchente e da vazante com

os principais agentes dinâmicos em estudo, afim de melhor compreender o comportamento da componente horizontal da maré nos diferentes sectores do estuário. Assim, considerando todos os ciclos de maré medidos nestas estações regidos por caudais fluviais baixos a moderados (Q_r<100m^3/s), constatou-se que as magnitudes máximas da velocidade da fase da enchente ($\overline{u}_{max.e}$) quando relacionadas com a altura da maré definiram correlações positivas, muito boas para todas as estações do estuário, mas apenas significativas na Embocadura e Gala, tendo sido representadas pelas expressões 5.3. 15 e 5.3. 16. Na Estação Elevatória a relação obtida fundamentou-se em apenas dois ciclos de maré, permitindo apenas fornecer uma tendência de variação de $\overline{u}_{max.e,EE}$ com $A_{w,EE}$ concordante com as restantes estações, como se ilustra no gráfico a) da figura 5.3.3. 4.

$$\overline{u}_{max.e,Emb} = 0.2344 * A_{w,Emb} + 0.0944 \text{ (para } Q_{r,Emb} \leq 92 m^3/s) \quad (5.3.15)$$

$$\overline{u}_{max.e,Gala} = 0.2 * A_{w,Gala} - 0.0036 \text{ (para } Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s) \quad (5.3.16)$$

As magnitudes mais elevadas de $\overline{u}_{max.e}$ foram assinaladas na estação mais próxima da foz, tendo diminuído para o interior do estuário, com decréscimos relativos médios da ordem dos 9% (de ≈0.05m/s) para a estação dos Cinco Irmãos e da ordem dos 32% (de ≈0.16m/s) para a estação da Gala. Considerando as distâncias destas estações à Embocadura de 1.5km e 6km, respectivamente, estes resultados indicaram taxas de decréscimos médias relativas às magnitudes de $\overline{u}_{max.e}$ da ordem dos 0.05/6≈0.01ms^{-1}/km ao longo do braço norte, e taxas médias de decréscimo das velocidades máximas da enchente da ordem dos 0.16/1.5≈0.11ms^{-1}/km ao longo do sector distal do braço sul. Estes resultados também descreveram ter havido um decréscimo pequeno das velocidades máximas da enchente ao longo do braço norte sob caudais $Q_{r,Mond}$<100m^3/s e um decréscimo relativo cerca de 10 vezes mais elevado para o sector distal do braço sul. Desta forma realçaram comportamentos hidrodinâmicos distintos nestes dois braços. Retractaram também uma maior facilidade de propagação da componente horizontal da onda de maré pelo canal principal do estuário. Estas taxas de decréscimo estimadas para os dois braços tenderam também a ser mais elevadas sob marés de maior altura, dado terem apresentado incrementos dos decréscimos de $\overline{u}_{max.e,5I}$ e de $\overline{u}_{max.e.Gala}$

relativamente a $\bar{u}_{max.e,Emb}$ para maiores marés (de acordo com os declives das respectivas equações de regressão expressos no gráfico a) da figura 5.3.3. 4. Relacionaram-se fundamentalmente com o incremento do atrito gerado nos escoamentos aquando da sua propagação por estes subsistemas pouco profundos e de fisiografias distintas (*sensus* Tonda, 1999) [2].

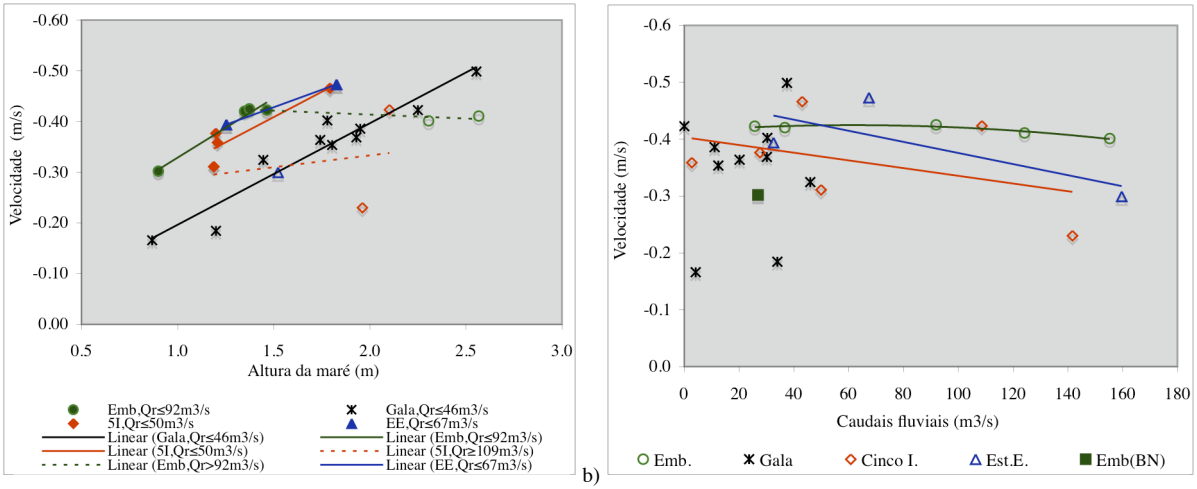


Figura 5.3.3. 4. Tendências de variação definidas entre as magnitudes das velocidades máximas da enchente ($u_{max,e}$) e a variação das magnitudes dos principais agentes hidrodinâmicos, nas quatro estações do estuário. No gráfico a) relacionou-se $u_{max,e}$ com a altura da maré (A_w), tendo sido definidas as seguintes regressões: $u_{max,e,Emb,Qr\leq92m^3/s}$= 0.2344*$A_{w,Emb}$+0.0944 com $r^2_{Emb,Aw,Qr\leq92m^3/s}$=0.96, $r_{Emb,Aw,Qr\leq92m^3/s}$=0.98, p<0.05, $N_{Emb,Qr\leq92m^3/s}$=4; $u_{max,e,Emb,Qr\geq92m3/s}$= 0.0156*$A_{w,Emb}$+0.4447 com $r^2_{Emb,Aw,Qr\geq92m^3/s}$=0.66, $r_{Emb,Aw,Qr\leq92m^3/s}$=0.82, $N_{Emb,Qr\geq92m^3/s}$=3; $u_{max,e,5I,Qr\leq50m3/s}$ =0.1992*$A_{w,5I}$-0.0036 com $r^2_{5I,Aw,Qr\leq50m^3/s}$=0.83, $r_{5I,Aw,Qr\leq50m^3/s}$=0.91, $N_{5I,Qr\leq50m^3/s}$=4; $u_{max,e,5I,Qr\geq109m3/s}$ =-0.0464*$A_{w,5I}$-0.2403 com $r^2_{5I,Aw,Qr\geq109m^3/s}$=0.06, $r_{5I,Aw,Qr\leq50m^3/s}$=0.23, $N_{5I,Qr\leq50m^3/s}$=3; $u_{max,e,Gala,Qr\leq46m3/s}$ =0.2*$A_{w,Gala}$-0.0036 com $r^2_{Gala,Aw,Qr\leq46m^3/s}$=0.83, $r_{Gala,Aw,Qr\leq46m^3/s}$=0.96, p<0.01, $N_{Gala,Qr\leq46m^3/s}$=10. No gráfico b) relacionou-se $\bar{u}_{max.e}$ com a magnitude das descargas fluviais (Q_r), tendo-se obtido as seguintes regressões: $u_{max,e,Emb,Qr\leq155m3/s}$ = 3x10^{-6}*$Q^2_{r,Emb}$-0.0003*$Q_{r,Emb}$-0.414 com $r^2_{Emb,Qr}$=0.93, $r_{Emb,Qr}$=-0.97, p<0.05, N_{Emb}=5; $u_{max,e,5I,Qr\leq142m3/s}$ =0.0007*$Q_{r,5I}$-0.4025 com $r^2_{5I,Qr}$=0.18, $r_{5I,Qr}$=-0.42 N_{5I}=6; $u_{max,e,EE,Qr\leq160m3/s}$ =0.0001*$Q_{r,EE}$-0.4732 com $r^2_{EE,Qr}$=0.54, $r_{EE,Qr}$=-0.74, N_{EE}=3. Na legenda, "Emb,Q_r≤92m^3/s", "5I,Q_r≤50m^3/s" e "EE,Q_r≤67m^3/s" representaram os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais inferiores a 92m^3/s, a 50m^3/s e a 67m^3/s nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. "Emb(BN)" representou o ciclo de maré aferido na secção transversal localizada na extremidade distal do braço norte, 100m a montante da secção transversal do canal denominada de Embocadura.

Os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais superiores a Q_r>100m^3/s foram apenas registados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Estação Elevatória, e foram representativos de marés com alturas compreendidas entre os 2.3≤$A_{w,Emb}$≤2.6m, 1.9≤$A_{w,5I}$≤2.1m e $A_{w,EE}$≈1.5m. Quando relacionadas as respectivas $\bar{u}_{max.e}$ com A_w verificou-se que as correlações anteriormente descritas deixaram de existir, passando a definir magnitudes destas velocidades tendencialmente mais pequenas, mesmo sob marés de maior amplitude, em resultado do efeito de amortecimento

[2]. Já que para esta análise não foram considerados os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais Q_r≥100m^3/s e consequentemente a componente da distorção de natureza fluvial foi minimizada.

mais elevado causado pelos caudais fluviais de maiores magnitudes e que se propagaram em sentido contrário, como se ilustra no gráfico a) da figura 5.3.3. 4. Este efeito de amortecimento, das velocidades máximas da enchente, também foi mais expressivo para as estações localizadas mais a montante, tendo sido desta forma tradutor de uma maior distorção por parte dos caudais do Mondego para os sectores mais proximais do estuário (com $\overline{u}_{max.e,Emb} > \overline{u}_{max.e,5I} > \overline{u}_{max.e,EE}$). Neste quadro de maior hidrodinamismo do Mondego, as diferenças registadas entre os dois braços realçaram-se ainda mais, quer quanto às magnitudes apresentadas, quer quanto às tendências de variação que passaram a ser opostas. Assim, as magnitudes de $\overline{u}_{max.e,Emb}$ e de $\overline{u}_{max.e,5I}$ passaram a reflectir importâncias inferiores às de $\overline{u}_{max.e,Gala}$ nas marés de maior amplitude e sob $Q_{r,Mondego}$ mais elevados, bem como, passaram a descrever tendências de variação de $\overline{u}_{max.e}$ proporcionalmente mais pequenas sob maiores caudais do Mondego e não com A_w nas estações representativas do braço norte, de acordo com os dois gráficos da figura 5.3.3. 4.

Quando confrontadas as magnitudes das velocidades máximas da enchente com os caudais fluviais, observaram-se correlações negativas apenas para as estações localizadas no canal principal do estuário (figura 5.3.3. 4.b). Na estação Elevatória, definiu apenas uma tendência de variação, mas quando associada à relação obtida entre $\overline{u}_{max.e,EE}$ com $A_{w,EE}$, atentou-se que neste sector mais proximal do estuário, que as magnitudes das velocidades da enchente tenham sido muito condicionadas pelos caudais do Mondego. Na estação dos Cinco Irmãos já localizada a 7.5km da foz, a correlação obtida foi apenas de $r_{5I,Qr}$=-0.42 sugerindo um decréscimo da importância relativa dos caudais do Mondego no amortecimento de $\overline{u}_{max.e,5I}$. Na Embocadura, quando analisados apenas os ciclos de maré realizados na confluência distal dos dois braços [3], assinalou-se uma correlação negativa muito boa, significativa, descrita pela equação 5.3. 17, e que terá representado um efeito de atenuação da magnitude de $\overline{u}_{max.e,Emb}$ por parte dos caudais fluviais, da ordem dos -0.0024m/s por

[3]. Excluindo-se o ciclo de maré realizado numa secção transversal no início do braço norte, 100m a montante da convencional estação da Embocadura.

cada incremento de $Q_{r,Emb} \approx 10 m^3/s$ (figura 5.3.3. 4.b). Estes resultados apontaram para que cerca de 96% da variabilidade as magnitudes das velocidades máximas da enchente na estação da Embocadura tenham sido explicadas pela maré, aquando de caudais fluviais baixos a moderados. Sob caudais mais elevados e compreendidos entre os $92 < Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, verificou-se que $\overline{u}_{max.e,Emb}$ passaram a ser reguladas particularmente pelas magnitudes de $Q_{r,Emb}$, dado que estes caudais passaram a explicar cerca de 93% da variabilidade de $\overline{u}_{max.e,Emb}$. Na estação da Gala, para as condições hidrodinâmicas abrangidas durante as actividades de campo de $0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.6m$ e de $Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$, verificou-se que a variabilidade de $\overline{u}_{max.e,Gala}$ foi explicada em cerca de 96% pela maré.

$$\overline{u}_{max.e,Emb} = 3x10^{-6} * Q_{r,Emb}^2 - 0.0003 * Q_{r,Emb} - 0.414 \text{ (para } Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \quad (5.3.17)$$

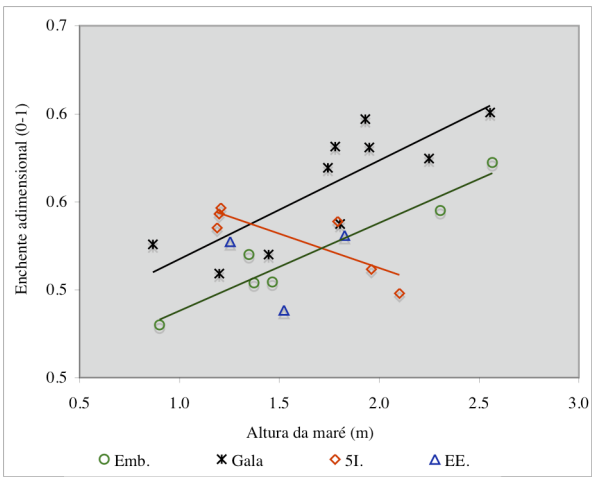
Considerando os períodos das fases de enchente adimensionais, representadas pelo intervalo $0 \leq P_e \leq 1$, verificou-se que a ocorrência destas velocidades de maior magnitude nesta fase ($t_{\overline{u}_{max.e}}$) descreveram correlações muito elevadas, positivas e significativas com a altura da maré para as estações da Embocadura e Gala, representadas pelas equações 5.3. 18 e 5.3. 19, expressas no gráfico a) da figura 5.3.3. 5.

$$t_{\overline{u}_{max.e,Emb}} = 0.0499 * A_{w,Emb} + 0.438 \text{ (para } 0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6m \text{ e } Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \quad (5.3.18)$$

$$t_{\overline{u}_{max.e,Gala}} = 0.0561 * A_{w,Gala} + 0.4612 \text{ (para } 0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.6m \text{ e } Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s) \quad (5.3.19)$$

Nestas duas estações, as velocidades máximas da enchente tiveram lugar praticamente durante a segunda metade desta fase e aconteceram tendencialmente mais tarde sob marés de maior amplitude, entre os 0.48 e os 0.6 das enchentes adimensionais. A ocorrência destas velocidades máximas na enchente na estação da Gala ao terem ilustrado atrasos médios da ordem das 0.19h (12 minutos) relativamente às ocorrências das $t_{\overline{u}_{max.e,Emb}}$ na Embocadura, levaram a considerar que a componente horizontal da maré apresentou nesta fase uma celeridade média na ordem de $1.5km/0.19h \approx 7.9 kmh^{-1}$ ao propagar-se ao longo deste troço distal do braço sul.

a)



b)

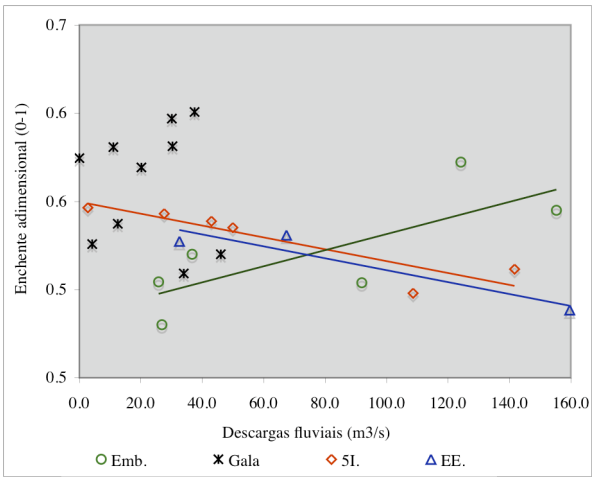


Figura 5.3.3. 5. Tendências de variação definidas entre as ocorrências das magnitudes máximas das velocidades da enchente adimensional ($t_{umax,e}$) e os principais agentes hidrodinâmicos em análise, para as diferentes estações do estuário: No gráfico a) relaciona-se $t_{umax,e}$ com a altura da maré (A_w) , tendo-se obtido as seguintes regressões: $t_{umax,e,Emb}=0.0499*A_{w,Emb}+0.438$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.93$, $r_{Emb,Aw}=0.96$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $t_{umax,e,Gala}=0.0561*A_{w,Gala}+0.4612$, com $r^2_{Gala,Aw}=0.67$, $r_{Gala,Aw}=0.82$, $p<0.01$, $N_{5I}=10$; $t_{umax,e,5I}=-0.0389*A_{w,5I}+0.5901$, com $r^2_{5I,Aw}=0.72$, $r_{5I,Aw}=-0.85$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$. No gráfico b) relaciona-se $t_{umax,e}$ com os caudais fluviais (Q_r), tendo sido definidas as seguintes equações de regressão: $t_{umax,e,Emb}=0.0005*A_{w,Emb}+0.4859$, com $r^2_{Emb,Qr}=0.58$, $r_{Emb,Qr}=-0.76$, $N_{Emb}=6$; $t_{umax,e,5I}=-0.0003*A_{w,5I}+0.5898$, com $r^2_{5I,Qr}=0.82$, $r_{5I,Qr}=-0.90$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$; $t_{umax,e,EE}=0.0003*A_{w,EE}+0.5448$, com $r^2_{EE,Qr}=0.89$, $r_{5I,Qr}=-0.94$, $N_{emb}=6$. Na legenda, "Emb", "Gala", "5I" e "EE" representaram os resultados obtidos para todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória.

A ocorrência das velocidades máximas durante a segunda metade da enchente, tendencialmente mais tarde sob marés de maior amplitude, ter-se-á relacionado com uma maior facilidade na entrada dos escoamentos após a submersão dos extensos ambientes intermareais dos troços de canal dos sectores médio-proximais dos braços norte e sul. Terão também interferido outros elementos fisiográficos, nomeadamente a disposição do braço norte no seguimento longitudinal da foz do estuário, conjugada com o facto de ter apresentado uma secção transversal do tipo trapezoidal, mais profunda no seu sector distal, que propiciaram uma maior capacidade de entrada dos escoamentos nas fases de maior altura da coluna de água. No braço sul, realça-se o facto de este canal a montante da estação da Gala ter passado a apresentar uma secção transversal muito mais ampla, que foi estreitando gradualmente até ao seu sector mais proximal. Este sector distal deste braço fez-se representar, quer por um canal bloqueado pelas comportas da Quinta do canal que regulavam os caudais do rio Pranto, quer por um estreito esteiro de maré por onde o braço

sul drenava exclusivamente para o braço norte parte da sua massa de água nas fases terminais da enchente e princípios da vazante das marés vivas[4] (figuras 5.2.3 e 5.2.4).

Na estação dos Cinco Irmãos, a correlação obtida entre $t_{\bar{u}_{max.e}}$ e $A_{w,5I}$ foi muito boa, negativa e significativa explicada pela equação 5.3. 20, mas de uma forma indirecta também relacionou as marés de maior amplitude com os caudais do Mondego mais elevados, visto que aquelas também tenderam a ter estado sujeitas a maiores descargas fluviais. Na Estação Elevatória não se assinalou qualquer relação válida entre $t_{\bar{u}_{max.e,EE}}$ com $A_{w,EE}$ (figura 5.3.3. 5.a).

$$t_{\bar{u}_{max.e,5I}} = -0.0389 * A_{w,5I} + 0.5901 \text{ (para } 1.2 \leq A_{w,5I} \leq 2.1\text{m e } Q_{r,5I} \leq 142\text{m}^3\text{/s)} \qquad (5.3.\ 20)$$

Quando relacionadas as ocorrências das velocidade máximas na enchente com os caudais fluviais, observaram-se correlações negativas muito boas para as estações dos Cinco Irmãos e Elevatória, tendo sido apenas significativa na primeira de acordo com a expressão 5.3. 21 (figura 5.3.3. 5.b).

$$t_{\bar{u}_{max.e,5I}} = -0.0003 * Q_{r,5I} + 0.5498 \text{ (para } 1.2 \leq A_{w,5I} \leq 2.1\text{m e } Q_{r,5I} \leq 142\text{m}^3\text{/s)} \qquad (5.3.\ 21)$$

Para estas estações, as velocidades máximas tiveram lugar praticamente a meio desta fase, tendo acontecido entre os 0.48 e os 0.54 da enchente adimensional, acontecendo tendencialmente mais cedo sob maiores descargas do Mondego. As $t_{\bar{u}_{max.e,EE}}$ tenderam a ocorrer pouco antes das $t_{\bar{u}_{max.e,5I}}$ e reflectir uma antecipação destas velocidades na estação mais distante da foz em resultado da uma maior influência dinâmica por parte dos caudais fluviais. Na estação dos Cinco Irmãos as tendências de variação negativas de $t_{\bar{u}_{max.e}}$ assinaladas com A_w e com Q_r, reflectiram um comportamento fundamentalmente condicionado pelos caudais fluviais, por ter expresso uma correlação significativa, apoiada num coeficiente de determinação mais elevado.

[4]. A extremidade proximal do braço sul era representada por um estreito canal de maré de cota de +2.2mZH que confluía para o braço norte na zona dos Cinco Irmãos, representado por um canal de cota média≈-1.2mZH.

5.3.3.5. Velocidades Máximas da Vazante

As magnitudes das velocidades máximas registadas durante as fases da vazante ($\overline{u}_{max.v}$) descreveram correlações positivas com a variação da altura da maré em todas as estações do estuário, como se ilustra no gráfico a) da figura 5.3.3. 6. Estas correlações foram boas nas estações dos Cinco Irmãos e Elevatória, e muito boas e significativas, nas estações da Embocadura e Gala, de acordo com as expressões 5.3. 22 e 5.3. 23.

$$\overline{u}_{max.v,Emb} = 0.1592 * A_{w,Emb} + 0.237 \text{ (para } 0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6m \text{ e } Q_{r,Emb} \leq 155m^3/s) \quad (5.3.\ 22)$$

$$\overline{u}_{max.v,Gala} = 0.1998 * A_{w,Gala} + 0.091 \text{ (para } 0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.6m \ Q_{r,Gala} \leq 46m^3/s) \quad (5.3.\ 23)$$

Uma vez que os coeficientes de correlação obtidos tenderam a diminuir para montante, levou a considerar terem reflectido uma menor importância relativa por parte da maré na variação das magnitudes $\overline{u}_{max.v}$ para as estações mais interiores do estuário. As magnitudes das velocidades máximas da vazante registadas na Embocadura foram superiores às da Gala, tendo exposto diferenças médias na ordem dos 16% (≈0.07m/s) quando considerados todos os ciclos de maré estudados [5] (equações 5.3. 22 e 5.3. 23). Porém, quando apreciados somente os regimes de maré sujeitos a caudais fluviais inferiores a $Q_{r,Emb} < 100m^3/s$, afim de minimizar a distorção induzida nesta fase da vazante pelos caudais do Mondego, que foram de magnitude muito superior às do Pranto (figura 5.3.3. 6.a), obtiveram-se diferenças ligeiramente superiores, na ordem dos 20% (≈0.11m/s). Sob regimes do Mondego compreendidos entre os $100 \leq Q_{r,Emb} < 155m^3/s$ as diferenças médias das $\overline{u}_{max.v}$ registadas entre estas estações, foram na ordem dos 11% (≈0.06m/s), que, à semelhança das anteriores, reforçaram as diferenças hidrodinâmicas ocorridas nos sectores distais dos dois canais principais do estuário. A correlação obtida entre $\overline{u}_{max.v,Emb}$ e $A_{w,Emb}$ para os ciclos de maré regidos por caudais $Q_{r,Emb} < 100m^3/s$ foi positiva, muito boa, significativa, e descrita pela equação 5.3. 24. Sob estas condições, as restantes estações localizadas mais para o interior do canal principal do estuário, passaram a descrever correlações boas, não significativas, que apontaram para uma

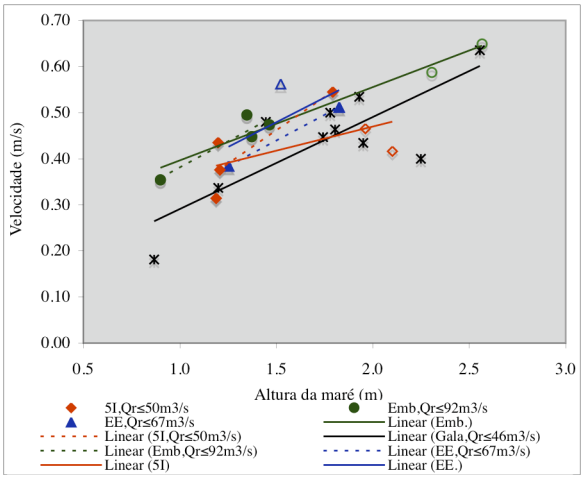
[5]. Retractado quadros hidrodinâmicos dinâmicos descritos por $0.9 \leq A_w \leq 2.6m$, $Q_{r,Emb} \leq 155m^3/s$ e $Q_{r,Gala} \leq 46m^3/s$.

tendência de decréscimo destas magnitudes para montante (com $\bar{u}_{max.v,Emb} > \bar{u}_{max.v,5I} > \bar{u}_{max.v,EE}$), sob marés de altura similar (figura 5.3.3. 6.a).

$$\bar{u}_{max.v,Emb} = 0.2265 * A_{w,Emb} + 0.1548 \quad (\text{para } 0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 1.6\text{m e } Q_{r,Emb} < 100\text{m}^3/\text{s}) \qquad (5.3.24)$$

Quando relacionadas as magnitudes das velocidades máximas da vazante com a variação da magnitude dos caudais fluviais registados nas diferentes estações, verificou-se que ocorreram bons ajustes, mas não significativos para as estações da Embocadura, Gala e Elevatória, como se ilustra no gráfico b) da figura 5.3.3. 6.

a)



b)

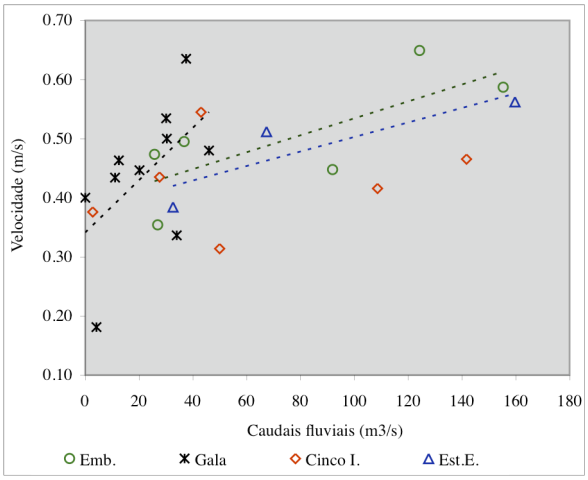


Figura 5.3.3. 6. Tendências de variação definidas entre as magnitudes máximas das velocidades da vazante ($u_{max,v}$) e os principais agentes hidrodinâmicos em análise, nas quatro estações do estuário. No gráfico a) relaciona-se $\bar{u}_{max.v}$ com a altura da maré (A_w), tendo-se definido as seguintes regressões: $u_{max,v,Emb,Qr\leq92m3/s} = 0.2265 * A_{w,Emb} + 0.1548$, com $r^2_{Emb,Qr\leq92m^3/s} = 0.85$, $r_{Emb,Qr\leq92m^3/s} = 0.95$, $p<0.05$, $N_{Emb,Qr\leq92m^3/s} = 4$; $u_{max,v,Emb,Qr\leq155m3/s} = 0.1592 * A_{w,Emb} + 0.237$, com $r^2_{Emb,Aw} = 0.95$, $r_{Emb,Aw} = 0.97$, $p<0.01$, $N_{Emb} = 6$; $u_{max,v,5I,Qr\leq142m3/s} = 0.1045 * A_{w,5I} + 0.2608$, com $r^2_{5I,Aw} = 0.32$, $r_{5I,Aw} = 0.56$, $N_{5I} = 6$; $u_{max,v,5I,Qr<50m3/s} = 0.2883 * A_{w,5I} + 0.0294$, com $r^2_{5I,Aw} = 0.76$, $r_{5I,Aw} = 0.87$, $N_{5I} = 4$; $u_{max,v,EE,Qr<160m3/s} = 0.2145 * A_{w,EE} + 0.1573$, com $r^2_{EE,Aw} = 0.45$, $r_{EE,Aw} = 0.67$, $N_{EE} = 3$; $u_{max,v,Gala,Qr\leq46m3/s} = 0.1998 * A_{w,Gala} + 0.091$, com $r^2_{Gala,Aw} = 0.65$, $r_{Gala,Aw} = 0.81$, $p<0.05$, $N_{Gala} = 10$. No gráfico b) relaciona-se $\bar{u}_{max.v}$ com as descargas fluviais (Q_r), definindo-se as seguintes regressões: $u_{max,v,Emb,Qr\leq155m3/s} = 0.0014 * Q_{r,Emb} + 0.3913$, com $r^2_{Emb,Qr} = 0.58$, $r_{Emb,Qr} = 0.76$, $N_{Emb} = 6$; $u_{max,v,EE,Qr\leq160m3/s} = 0.0012 * Q_{r,EE} + 0.3801$, com $r^2_{EE,Qr} = 0.77$, $r_{EE,Qr} = 0.88$, $N_{EE} = 3$; $u_{max,v,Gala,Qr\leq46m3/s} = 0.0044 * Q_{r,Gala} + 0.3411$, com $r^2_{Gala,Qr} = 0.31$, $r_{Gala,Qr} = 0.56$, $N_{Gala} = 10$. Na legenda, "Emb", "Gala", "5I" e "EE" representaram os resultados obtidos para todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória.

Estas regressões descreveram tendências de aumento das magnitudes de $\bar{u}_{max.v}$ sob caudais fluviais mais elevados em resultado de $\bar{u}_{max.v}$ e Q_r se terem movimentado no mesmo sentido. Possibilitaram, ainda quantificar estas tendências com valores na ordem dos $0.014 ms^{-1}$, dos $0.012 ms^{-1}$ e dos $0.044\ ms^{-1}$, por cada incremento de $Q_r \approx 10 m^3/s$, para as estações da Embocadura, Elevatória e Gala, respectivamente. Permitiram, igualmente, localizar os maiores incrementos

relativos de $\overline{u}_{max.v}$ com Q_r na estação da Gala e relacioná-los particularmente com a amplificação acontecida dos escoamentos de vazante resultante do estreitamento ocorrido na secção transversal do braço sul junto à ponte da Gala (efeito de convergência), como se ilustra na figura 5.3.3. 6.b. Esta apreciação foi corroborada com as observações nesta estação situada no princípio deste estreitamento, de ondas estacionárias formadas durante o final da primeira metade da vazante, aquando de marés de maior amplitude, descritas no subcapítulo 4.1.

Nas estações da Embocadura e Estação Elevatória, os ajustes obtidos ilustraram velocidades máximas da vazante com magnitudes muito semelhantes entre si (figura 5.3.3. 6.b), que foram ligeiramente mais elevadas (≈0.03m/s em média) para a estação mais distal e localizada imediatamente após a confluência dos dois braços. As características fisiográficas muito artificiais deste canal principal do estuário terão sido favoráveis a uma elevada capacidade de drenagem dos escoamentos de vazante, fundamentada no registo de variações das magnitudes de $\overline{u}_{max.v}$ muito semelhantes entre as estações que o compõem, quer quando relacionadas com os caudais do Mondego, quer com a altura da maré (figura 5.3.3. 6).

Estes resultados aludiram para que cerca de 85% da variabilidade das magnitudes das velocidades máximas da vazante na estação da Embocadura tenham sido explicadas pela maré, aquando de caudais fluviais baixos a moderados. Sob caudais mais elevados e compreendidos entre os $92<Q_{r,Emb}\leq155 m^3/s$, verificou-se que $\overline{u}_{max.e,Emb}$ continuaram a ser reguladas fundamentalmente pelas magnitudes de $A_{w,Emb}$, mas com uma contribuição considerável de $Q_{r,Emb}$, uma vez que, estes agentes explicaram 95% e 58%, respectivamente da variabilidade de $\overline{u}_{max.e,Emb}$. Na estação da Gala, verificou-se que a variabilidade de $\overline{u}_{max.e,Gala}$ foi explicada em 65% pela variação da altura da maré, para apenas 31% por parte dos caudais do Pranto. Contudo, aspectos relacionados com a fisiografia do braço sul, e difíceis de quantificar, terão tido uma maior componente na regulação de $\overline{u}_{max.e,Gala}$.

Analisada a ocorrência destas velocidades máximas durante o período da fase de vazante adimensional ($t_{\overline{u}_{max.v}}$), representado pelo intervalo $0\leq P_v\leq1$, verificou-se para as marés de maior

amplitude nas estações da Embocadura e Gala, as $\bar{u}_{max.v}$ definiram tendências para acontecerem mais cedo e durante a primeira metade desta fase, entre os 0.35 e os 0.5. Nos Cinco Irmãos verificou-se o oposto, com as $\bar{u}_{max.v,5I}$ a terem ocorrido tendencialmente mais tarde nesta fase da vazante, entre os 0.40 e os 0.70, mas principalmente associadas ao incremento dos caudais do Mondego, como se ilustra no gráfico a) da figura 5.3.3. 7. Na Gala, este comportamento ter-se-á relacionado com a drenagem, durante a primeira metade da vazante, de um grande volume de água que submergia os ambientes intermareais dos sectores médio-proximal do braço sul. Na Embocadura relacionou-se com a saída de uma massa de água de maior dimensão acumulada ao longo do braço norte e que também inundava os ambientes intermareais do sector proximal deste canal. Terá acrescido o facto de este troço anterior do canal principal do estuário, representado pela embocadura e pelo braço norte, ter sido mais profundo, mais amplo que o troço distal do braço sul, bem como, ter-se encontrado no seguimento longitudinal da foz do estuário, o que terá favorecido logo após a preia-mar, a saída de um maior volume de água proveniente do braço norte. As correlações obtidas foram sido significativas apenas na Gala (equação 5.3. 25).

$$t_{\bar{u}_{max.v,Gala}} = -0.0934 * A_{w,Gala} + 0.5871 \qquad (5.3.\ 25)$$

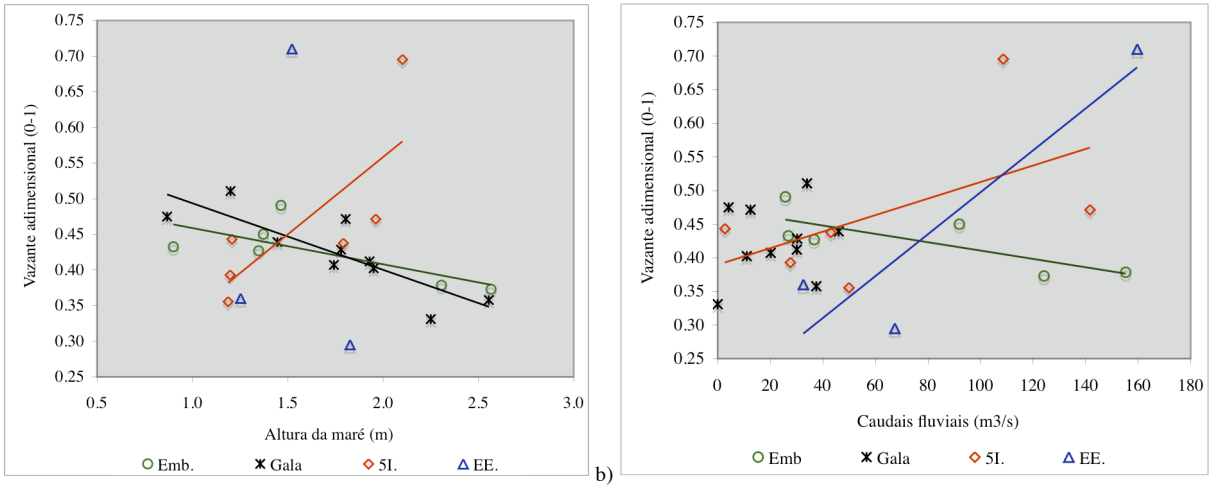


Figura 5.3.3. 7. Tendências de variação definidas entre as ocorrências das velocidades máximas na vazante adimensional (t_{umax}) e os principais agentes hidrodinâmicos, nas quatro estações do estuário. No gráfico a) relaciona-se t_{umax} com a altura da maré (A_w), tendo-se definido as seguintes regressões: $t_{umax,v,Emb}=-0.0508*A_{w,Emb}+0.5096$ com $r^2_{Emb,Aw}=0.53$, $r_{Emb,Aw}=-0.73$, $N_{Emb}=6$; $t_{umax,v,Gala}=-0.0934*A_{w,Gala}+0.5871$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.71$, $r_{Gala,Aw}=-0.84$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$; $t_{umax,v,5I}=-0.217*A_{w,5I}+0.1243$ com $r^2_{5I,Aw}=0.59$, $r_{5I,Aw}=0.77$, $N_{5I}=6$. No gráfico b) Tendências de variação de t_{umax} com as descargas fluviais (Q_r), obtendo-se obtido as regressões: $t_{umax,v,Emb}=-0.0006*Q_{r,Emb}+0.4729$ com $r^2_{Emb,Qr}=0.60$, $r_{Emb,Qr}=-0.78$, $N_{Emb}=6$; $t_{umax,v,5I}=0.0012*Q_{r,5i}+0.3895$ com $r^2_{5I,Qr}=0.60$, $r_{5I,Qr}=0.54$, $N_{5I}=6$; $t_{umax,v,EE}=0.0031*Q_{r,EE}+0.1859$ com $r^2_{EE,Qr}=0.84$, $r_{EE,Qr}=0.92$, $N_{EE}=3$. Na legenda, "Emb", "Gala", "5I" e

"EE" representaram os resultados obtidos para todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória.

Quando relacionadas as $t_{\bar{u}_{max.v}}$ com os caudais fluviais, obtiveram-se correlações boas, mas não significativas, apenas nas estações do canal principal do estuário (figura 5.3.3. 7.b). Na Embocadura a correlação alcançada foi negativa, tendo expressado uma tendência de ocorrência das $\bar{u}_{max.v,Emb}$ mais cedo e durante a primeira metade da vazante sob caudais fluviais mais elevados. Nas estações dos Cinco Irmãos e Elevatória as correlações obtidas foram positivas tendo expressado maiores atrasos de $t_{\bar{u}_{max.v}}$ com Q_r compreendidos entre os 0.3 e os 0.7 da vazante adimensional, em grande parte relacionados com a irregularidade dos caudais do Mondego durante os ciclos de maré. Esta irregularidade deveu-se, por exemplo, à abertura ocasional das comportas da estação Elevatória do rio Foja apenas durante as fases da vazante, afim de escoar os caudais deste rio e os do leito antigo do rio Mondego.

5.3.3.6. Comparação das Magnitudes das Velocidades Máximas

Com o objectivo de comparar as magnitudes das velocidades máximas da enchente e da vazante registadas nos diferentes ciclos de marés na estação da Embocadura, recorreu-se às expressões 5.3. 17 e 5.3. 24, respectivamente. Os resultados obtidos indicaram que as velocidades máximas da vazante apresentaram magnitudes superiores às da enchente nas marés de menor amplitude ($A_w \approx 0.9m$), decrescendo gradualmente esta diferença até se igualarem sob marés de altura $A_{w,Emb} \approx 1.9m$ e regimes fluviais de $Q_{r,Emb} \leq 100 m^3/s$. Para marés de maior amplitude $1.9 < A_{w,Emb} \leq 2.6m$ e caudais compreendidos entre $124 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, as velocidades máximas da enchente passaram a descrever magnitudes tendencialmente mais elevadas às da vazante. Uma vez que estes resultados reflectiram, para marés de maior amplitude, aumentos relativos das $\bar{u}_{max.e}$ superiores às acontecidas com $\bar{u}_{max.v}$, bem como, períodos de enchente tendencialmente mais curtos (figura 5.3.3. 5), de acordo com Blanton *et al* (2000) e Blanton & Andrade (2001) eles descreveram de uma forma qualitativa aumentos da distorção dos escoamentos desta estação, bem como,

apontaram para uma tendência evolutiva de domínio da enchente. Na estação da Gala, os resultados obtidos apontaram para que as velocidades máximas da vazante tenham exibido magnitudes ligeiramente superiores às da enchente, com um valor que rondou os $\overline{u}_{max.v} - \overline{u}_{max.e} \approx 0.09$m/s sob caudais fluviais $Q_r \leq 46 m^3/s$, uma vez que as equações usadas para estimar estas velocidades apresentaram declives iguais (equações 5.3. 19 e 5.3. 8). O registo de velocidades máximas da vazante de magnitude superior quando conciliado com períodos de enchente gradualmente mais curtos sob marés de maior amplitude, de acordo com os referidos autores, não apontam para um domínio claro de uma das fases da maré nesta estação. Magnitudes da componente horizontal da fase da vazante tendencialmente mais elevadas coligadas com períodos de vazante mais longos decorrentes nas estações Elevatória e nos Cinco Irmãos, indiciaram tendências evolutivas de domínio da vazante para estes sectores mais interiores do estuário.

5.3.3.7. Amplitude de Variação da Velocidade

Da análise do gráfico a) da figura 5.3.3. 8, onde se relaciona a amplitude de variação da velocidade ($a_{\overline{u}}$) com a variação da superfície livre (A_w), de todos os ciclos de maré estudados no estuário, registaram-se para as estações da Embocadura, Gala e Estação Elevatória, correlações muito boas e positivas, apenas significativas nas duas primeiras, de acordo com as equações 5.3. 26 e 5.3. 27. Na estação dos Cinco Irmãos, a correlação alcançada foi de apenas r=0.45.

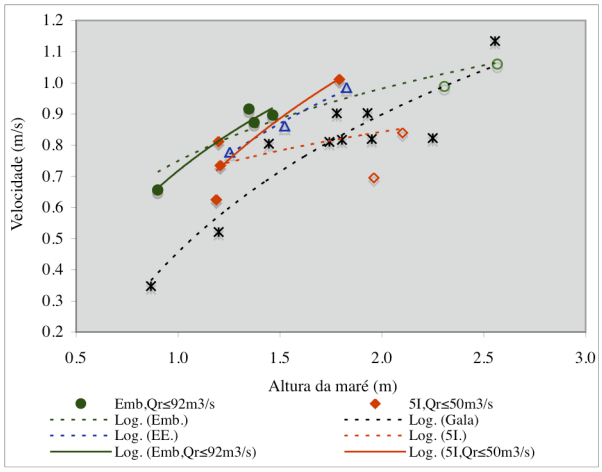
$$a_{\overline{u},Emb} = 0.3404 * Ln(A_{w,Emb}) + 0.7483 \quad (\text{para } 100 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \qquad (5.3.\ 26)$$

$$a_{\overline{u},Gala} = 0.6375 * Ln(A_{w,Gala}) + 0.4562 \quad (\text{para } 0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.6m \text{ e } Q_{r,Pranto} \leq 46 m^3/s) \qquad (5.3.\ 27)$$

Estes resultados permitiram descrever para marés de maior altura, um aumento do hidrodinamismo para os diferentes sectores em análise no estuário, que se fundamentou em registos de magnitudes mais pequenas de $a_{\overline{u}}$ nas marés mortas e de magnitudes mais elevadas sob marés vivas (figura 5.3.3. 8.a). A Embocadura foi a estação do estuário que apresentou o hidrodinamismo mais elevado por ter exibido as maiores amplitudes de variação da velocidade. As magnitudes de $a_{\overline{u},Emb}$ tenderam a decrescer de uma forma desigual para as estações dos Cinco Irmãos e Gala, e

assim ter realçado comportamentos hidrodinâmicos distintos nos dois braços do estuário. Estes decréscimos de $a_{\bar{u}}$ terão estado associados, quer a uma dissipação da energia dos escoamentos aquando da sua propagação nestes troços com fisiografias distintas, quer com uma distorção fluvial imposta por caudais assimétricos do Mondego e do Pranto. Nos Cinco Irmãos, a tendência de variação registada de $a_{\bar{u},5I}$ com $A_{w,5I}$ para além de ter traduzido um decréscimo de $a_{\bar{u}}$ relativamente a $a_{\bar{u},Emb}$, indiciou que este decréscimo foi tendencialmente mais elevado sob marés de maior altura, e de uma forma indirecta, com caudais fluviais de maior magnitude. Este enfraquecimento das magnitudes das velocidades máximas de enchente ter-se-ão relacionado, quer com o atrito gerado ao longo do braço norte, quer com a distorção imposta pelos caudais do Mondego, como se ilustra na figura 5.3.3. 4.

a)



b)

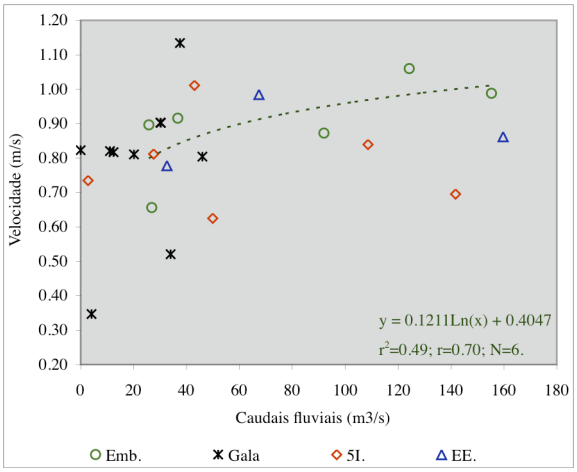


Figura 5.3.3. 8. Tendências definidas ente a variação da velocidade média (a_u) e as magnitudes dos agentes hidrodinâmicos em análise. No gráfico a) relaciona-se a_u com a amplitude da maré (A_w), obtendo-se as seguintes regressões: $a_{u,Emb,Qr\leq92m3/s}=0.5291*Ln(A_{w,Emb})+0.7171$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.95$, $r_{Emb,Aw}=0.97$, $p<0.05$, $N_{Emb}=4$; $a_{u,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.3404*Ln(A_{w,Emb})+0.7483$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.90$, $r_{Emb,Aw}=0.95$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $a_{u,5I,Qr\leq50m3/s}=0.7203*Ln(A_{w,5I})+0.5932$, com $r^2_{5I,Aw,Qr\leq50m^3/s}=0.80$, $r_{5I,Aw,Qr\leq50m^3/s}=0.86$, $N_{5I,Qr\leq50m^3/s}=4$; $a_{u,Gala,Qr\leq46m3/s}=0.6375*Ln(A_{w,Gala})+0.4562$, com $r^2_{Gala,Aw}=0.87$, $r_{Gala,Aw}=0.93$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; $a_{u,5I,Qr\leq160m3/s}=0.2116*Ln(A_{w,5I})+0.6974$, com $r^2_{5I,Aw,Qr\leq160m^3/s}=0.18$, $r_{5I,Aw,Qr\leq160m^3/s}=0.45$, $N_{5I,Qr\leq50m^3/s}=6$; $a_{u,EE,Qr\leq142m3/s}=0.5482*Ln(A_{w,EE})+0.6471$, com $r^2_{EE,aw}=0.98$, $r_{EE,aw}=0.992$, $N_{EE}=3$. No gráfico b) relaciona-se a_u com os caudais fluviais (Q_r), definindo-se apenas a regressão $a_{u,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.1211*Ln(A_{w,Emb})+0.4047$, com $r^2_{Emb,Qr\leq155m^3/s}=0.49$, $r_{Emb,Qr\leq155m^3/s}=0.70$, $N_{Emb,Qr\leq155m^3/s}=6$. Na legenda, "Emb,$Q_r\leq92m^3/s$" e "5I,$Q_r\leq50m^3/s$" representaram os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais inferiores a $92m^3/s$ e a $50m^3/s$ nas estações da Embocadura e Cinco Irmãos.

A comparação das magnitudes e das tendências de variação de $a_{\bar{u}}$, ocorridas entre as estações da Gala e da Embocadura, permitiu diferenciar um conjunto de desigualdades hidrodinâmicas entre os sectores distais dos dois canais principais do estuário, que consistiram no

registo na Gala das menores amplitudes de variação da velocidade de todo o estuário aquando de marés mortas (com $a_{\bar{u},Gala} << a_{\bar{u},Emb}$). Ao contrário da $a_{\bar{u},Emb}$ as magnitudes da $a_{\bar{u},Gala}$ não se relacionaram com $Q_{r,Gala}$ (figura 5.3.3. 8.b), bem como, observou-se uma tendência de aumento da $a_{\bar{u},Gala}$ superior à verificada na $a_{\bar{u},Emb}$ sob marés de maiores amplitude e/ou sob maiores caudais do Mondego, como se ilustra no declive mais acentuado da respectiva curva de regressão logaritmica do gráfico a) da figura 5.3.3. 8. Acresceu, o facto de estas estações terem apresentado uma diferença hidrodinâmica média de ≈17% fundamentada em valores médios da $\overline{a}_{\bar{u},Gala} \approx 0.78m/s$ e da $\overline{a}_{\bar{u},Emb} \approx 0.92m/s$, determinados apartir das equações 5.3. 26 e 5.3. 27 para o intervalo $0.9 \leq A_w \leq 2.6m$. A tendência de aumento mais elevada da $a_{\bar{u},Gala}$ relativamente à acontecida em $a_{\bar{u},Emb}$ descreveu para marés mortas de $A_w=0.9m$ (e caudais fluviais baixos de $Q_{r,Gala} \approx 4m^3/s$ e $Q_{r,Emb} \approx 27m^3/s$) valores da $a_{\bar{u},Emb} \approx 0.71m/s$, que foram 0.32m/s mais elevados aos registados na Gala (com $a_{\bar{u},Gala} \approx 0.39m/s$) e indiciaram uma hidrodinâmica da estação do braço sul, 45% mais pequena. Esta diferença hidrodinâmica esbateu-se com o aumento quer da amplitude da maré, quer dos caudais do Mondego, uma vez ter-se verificado para $A_w=2.6m$ (e $Q_{r,Gala} \approx 18m^3/s$ e $Q_{r,Emb} \approx 124m^3/s$) magnitudes de $a_{\bar{u}}$ muito semelhantes na Embocadura e na Gala, com $a_{\bar{u},Emb} \approx 1.06m/s$ e $a_{\bar{u},Gala} \approx 1.04m/s$. Esta tendência de aumento de $a_{\bar{u},Gala}$ mais elevada ter-se-á relacionado com o enfraquecimento das magnitudes das velocidades máximas da enchente no canal principal do estuário, gerado pelos caudais do Mondego que foram pelo menos 8 vezes mais elevados aos do Pranto (figura 5.3.3. 4.a), assim como, com uma ampliação das magnitudes das velocidades máximas da vazante ocorrida na estação do braço sul aquando de marés de maior amplitude, em resposta ao afunilamento acontecido na secção transversal do canal junto à ponte da Gala (fenómeno de convergência).

A análise anterior entrou em linha de conta com todos os períodos de maré estudados nas estações da Embocadura e nos Cinco Irmãos, tendo abrangido os dois ciclos que representaram as marés vivas ($2.3 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6m$; $1.9 \leq A_{w,5I} \leq 2.1m$) e que também registaram as maiores descargas

fluviais compreendidas entre os $124 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$ e os $109 \leq Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s$, respectivamente. Considerando nestas estações apenas os ciclos de maré regidos por caudais do Mondego $Q_r < 100 m^3/s$, passaram-se a obter correlações positivas, muito boas, somente significativa para a Embocadura de acordo com a equação 5.3. 28, expressa no gráfico a) da figura 5.3.3. 8.

$$a_{\bar{u},Emb} = 0.3404 * Ln(A_{w,Emb}) + 0.7483 \quad (\text{para } Q_{r,Emb} < 100 m^3/s) \qquad (5.3.\ 28)$$

Estes resultados passaram a ilustrar magnitudes relativas de $a_{\bar{u},Qr<100m^3/s}$ superiores às de $a_{\bar{u},Emb}$ e às de $a_{\bar{u},5I}$ nas marés de maior A_w (dado ter-se atenuado a distorção fluvial do Mondego), e passado a descrever para marés compreendidas entre os $1.0 \leq A_w \leq 2.0m$, magnitudes médias de $a_{\bar{u},Emb,Qr\leq 92m^3/s}$ 23% superiores às de $a_{\bar{u},Gala}$, e magnitudes 8% mais elevadas ás de $a_{\bar{u},5I,Qr\leq 50m^3/s}$, reveladoras de diferentes decréscimos de $a_{\bar{u}}$ nos dois canais principais do estuário. Ao longo do sector distal do braço sul a taxa de decréscimo de $a_{\bar{u}}$ foi da ordem dos $0.22/1.5 \approx 0.14 ms^{-1}/km$, enquanto ao longo do braço norte foi da ordem dos $0.06/6 \approx 0.01 ms^{-1}/km$, tendo reflectido para o canal principal do estuário, quer um maior hidrodinamismo, quer um menor atrito nos escoamentos gerado pela fisiografia, que se traduziu numa maior propagação da componente horizontal da maré.

Na Estação Elevatória, apesar do baixo número de ciclos de maré estudados, os resultados obtidos apontaram para que tenha havido um pequeno decréscimo das $a_{\bar{u},EE}$ relativamente às magnitudes registadas nos Cinco Irmãos ($\bar{a}_{\bar{u},5I,Qr\leq 50m3/s}$), aquando de regimes do Mondego mais pequenos ($Q_r < 100 m^3/s$) (figura 5.3.3. 8.a). Esta tendência de decréscimo de $a_{\bar{u}}$ ocorrida ao longo deste troço de canal com 8km de comprimento, sugere ter sido da ordem dos 0.01m/s por cada aumento de $A_w \approx 0.1m$ e terá descrito para marés compreendidas entre os $1.2 \leq A_w \leq 1.9m$ uma magnitude média da ordem dos $(\bar{a}_{\bar{u},EE} - \bar{a}_{\bar{u},5I,Qr\leq 50m3/s}) \approx 0.03 m/s$. Esta ligeira tendência de diminuição longitudinal de $a_{\bar{u}}$ para o interior do estuário poderá ter sido reflexo em parte de um menor retardamento gerado nos escoamentos pela fisiografia deste troço de canal, que terá propiciado a entrada da maré. A montante dos Cinco Irmãos, realça-se o facto de o segmento do canal principal do estuário ter sido mais profundo, tendencialmente mais estreito e desprovido de ambientes

intermareais e de ter apresentado um traçado longitudinal muito rectilíneo com uma secção transversal trapezoidal. Sob caudais do Mondego mais elevados, compreendidos entre $109 \leq Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s$, os resultados obtidos passaram a descrever magnitudes das $a_{\bar{u},5I}$ muito mais pequenas às registadas sob $\overline{a}_{\bar{u},5I,Qr\leq 50m3/s}$, e a definir relativamente à estação Elevatória uma tendência de aumento de $a_{\bar{u}}$ para montante. Esta, à semelhança do acontecido na Embocadura, relacionou-se particularmente com o aumento do amortecimento das magnitudes das velocidades máximas da enchente, gerado pelos caudais fluviais. Nesta estação mais distante da foz, as magnitudes de $a_{\bar{u},EE}$ apresentaram tendências de variação muito semelhantes quer se tenha ou não considerado os ciclos de maré sob caudais do Mondego inferiores a $Q_{r,EE} \leq 67\ m^3/s$ ou a $Q_{r,EE} \leq 160 m^3/s$, comportamento este, relacionado com a fisiografia deste sector do estuário, e com a sua hidrodinâmica regida sobretudo pelos caudais fluviais e também sob a influência da maré dinâmica.

Na estação da Embocadura, a variação da amplitude da velocidade de cada ciclo de maré foi fundamentalmente regulada pela variação da superfície livre ($A_{w,Emb}$), tendo esta explicado cerca de 95% da variabilidade de $a_{\bar{u},Emb}$. Sob caudais fluviais elevados da ordem dos $100 < Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, verificou-se que a altura da maré continuou a explicar cerca de 90% da variabilidade de $a_{\bar{u},Emb}$ enquanto $Q_{r,Emb}$ apenas cerca de 70%, como se ilustra nos dois gráficos da figura 5.3.3. 8. Na estação da Gala, a maré também terá regularizado a variação das magnitudes de $a_{\bar{u},Gala}$, uma vez que $A_{w,Gala}$ explicou cerca de 87% da sua variabilidade. Na estação dos Cinco Irmão a importância relativa da maré na variação de $a_{\bar{u},5I}$ decresceu para valores da ordem dos 18%, indiciando um decréscimo da importância relativa da maré para os sectores mais interiores do estuário.

Muito embora se tenham obtido entre $a_{\bar{u}}$ e A_w correlações lineares muito boas, optou-se por considerar a função logaritmica por ter apresentado melhores ajustes entre estas duas variáveis nas diferentes estações do estuário, e consequentemente, ter definido coeficientes de determinação mais

elevados, mas também, pela maioria dos perfis de velocidades efectuados na coluna de água terem apresentado um comportamento logaritmo.

5.3.3.8. Força da Maré

De acordo com Fisher (1972), o parâmetro $[U_{rms}]^3$ usado em denominador do Número de Estuário Internacional, reflecte a força exercida pela maré expressa sob a forma de uma velocidade. Uma vez verificados comportamentos de variação directos e proporcionais entre vários parâmetros da componente horizontal da maré e a variação da superfície livre, considerou-se também da maior importância, relacioná-los com o parâmetro $[U_{rms}]^3$, por este poder descrever a importância relativa da maré na hidrodinâmica das diferentes estações do estuário. Assim, quando relacionadas as magnitudes das velocidades máximas da enchente e da vazante com este parâmetro, constatou-se que estas descreveram variações directas e proporcionais em todas as estações do estuário, de acordo com os dois gráficos da figura 5.3.3. 9.

Quando relacionadas as magnitudes das $\overline{u}_{max.e}$ com $[U_{rms}]^3$, registaram-se correlações muito boas nas diferentes estações do estuário apenas quando sob regimes fluviais menores que $Q_r<100m^3/s$, de acordo com o gráfico a) da figura 5.3.3. 9, aquelas foram descritas pelas equações significativas 5.3. 29, 5.3. 30 e 5.3. 31.

$$\overline{u}_{max.e,Emb} = -5.8565 * [U_{rms,Emb}]^3 - 0.2329 \quad (\text{para } Q_{r,Emb} \leq 92m^3/s) \qquad (5.3.\ 29)$$

$$\overline{u}_{max.e,Gala} = -5.4207 * [U_{rms,Gala}]^3 - 0.2088 \quad (\text{para } Q_{r,Gala} \leq 46m^3/s) \qquad (5.3.\ 30)$$

$$\overline{u}_{max.e,5I} = -3.6673 * [U_{rms,5I}]^3 - 0.2857 \quad (\text{para } Q_{r,5I} \leq 50m^3/s) \qquad (5.3.\ 31)$$

Para além de terem representado maiores valores das $\overline{u}_{max.e}$ sob maiores velocidades de $[U_{rms}]^3$, também apontaram para decréscimos diferenciados das $\overline{u}_{max.e}$ ao longo dos dois braços do estuário, de acordo com o gráfico a) da figura 5.3.3. 9. O valor referenciado nesta figura por "Emb(BN)" ao ter correspondido ao ciclo de maré aferido no início do braço norte[3] terá apresentado uma magnitude de $\overline{u}_{max.e}$ ligeiramente subestimada. Quanto às magnitudes de $\overline{u}_{max.e,EE}$, apontaram para um incremento relativamente às registadas nos Cinco Irmãos, tendo corroborado o efeito de convergência gerado pela fisiografia deste troço de canal, anteriormente citado. Sob maiores

caudais do Mondego ($100 \leq Q_r \leq 155 m^3/s$) verificou-se um decréscimo das magnitudes das $\overline{u}_{max.e}$ para as diferentes estações localizadas apenas no canal principal do estuário. Estes comportamentos das $\overline{u}_{max.e}$ com $[U_{rms}]^3$ foram muito semelhantes aos relatados anteriormente, quando relacionadas as $\overline{u}_{max.e}$ com a variação da superfície livre (figura 5.3.3. 4.a).

Quando relacionadas as $\overline{u}_{max.v}$ com $[U_{rms}]^3$, verificou-se ter havido regressões muito boas e positivas em todas as estações do estuário, representadas no gráfico b) da figura 5.3.3. 9. Apenas na Estação Elevatória a regressão obtida não foi significativa, tendo as restantes sido descritas pelas funções lineares 5.3. 32, 5.3. 33 e 5.3. 34.

$$\overline{u}_{max.v,Emb} = -5.8565 * [U_{rms,Emb}]^3 - 0.2329 \quad (\text{para } Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \qquad (5.3.\ 32)$$

$$\overline{u}_{max.v,Gala} = -5.4207 * [U_{rms,Gala}]^3 - 0.2088 \quad (\text{para } Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s) \qquad (5.3.\ 33)$$

$$\overline{u}_{max.v,5I} = -3.6673 * [U_{rms,5I}]^3 - 0.2857 \quad (\text{para } Q_{r,5I} \leq 142 m^3/s) \qquad (5.3.\ 34)$$

Estas regressões relacionaram as maiores magnitudes das velocidades máximas da vazante com as marés de maior força e consequentemente com as de maior amplitude (figura 5.3.3. 9.b), bem como, definiram apenas ao longo do canal principal do estuário uma tendência de decréscimo das magnitudes de $\overline{u}_{max.v}$ para montante, que foi tendencialmente mais elevada sob maiores valores de $[U_{rms}]^3$. Relativamente ao braço sul, mostraram que as magnitudes de $\overline{u}_{max.v}$ na Gala foram superiores às registadas na Embocadura ($\overline{u}_{max.v,Gala} > \overline{u}_{max.v,Emb}$) para marés de igual força ($[U_{rms}]^3$), e que esta diferença de magnitudes tendeu a aumentar sob marés de maior amplitude. Este comportamento das magnitudes de $\overline{u}_{max.v,Gala}$ corroborou o efeito de ampliação das magnitudes das velocidades da vazante anteriormente mencionado, resultante da convergência destes escoamentos pela fisiografia do braço sul nesta estação.

Estes resultados também possibilitaram associar os aumentos das magnitudes das $\overline{u}_{max.e}$ e das $\overline{u}_{max.v}$, quer com o incremento da força da maré (incremento de $[U_{rms}]^3$), quer com o aumento da altura da maré, como se demonstra na figura seguinte.

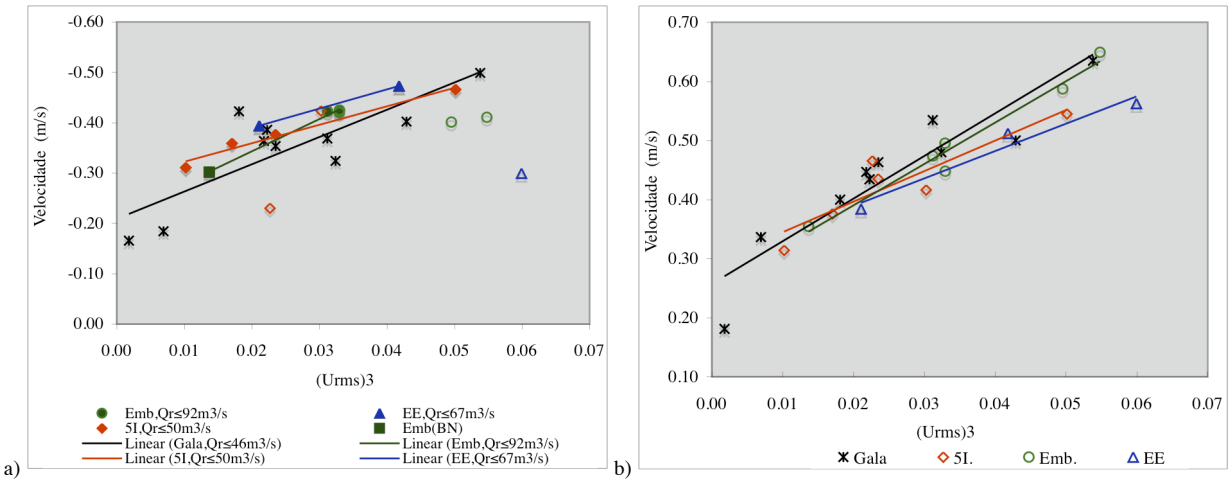


Figura 5.3.3. 9. Tendências de variação definidas entre as magnitudes máximas das velocidades da enchente e da vazante com a variação do parâmetro $(U_{rms})^3$. No gráfico a) relaciona-se a fase da enchente, tendo-se definido as seguintes regressões: $u_{max,e,Emb,Qr\leq92m3/s}$=-5.8565*$[U_{rms,Emb}]^3$-0.2329, com $r^2_{Emb,Urms,Qr\leq92m3/s}$=0.99, $r_{Emb,Urms,Qr\leq92m3/s}$=0.996, p<0.05, $N_{Emb,Qr\leq92m3/s}$=4; $u_{max,e,5I,Qr\leq50m3/s}$=-3.6673*$[U_{rms,5I}]^3$-0.2857, com $r^2_{5I,Urms,Qr\leq50m3/s}$=0.98, $r_{5I,Urms,Qr\leq50m3/s}$=0.988, p<0.05, $N_{5I,Qr\leq50m3/s}$=4; $u_{max,e,Gala,Qr\leq46m3/s}$=-5.4207*$[U_{rms,Gala}]^3$-0.2088, com $r^2_{Gala,Urms,,Qr\leq46m3/s}$=0.68, $r_{Gala,Urms,,Qr\leq46m3/s}$=0.83, p<0.01, $N_{Gala,Qr\leq46m3/s}$=10. No gráfico b) relaciona-se na fase da vazante, tendo-se obtido as seguintes regressões: $u_{max,v,Emb,Qr\leq155m3/s}$=-5.8565*$[U_{rms,Emb}]^3$-0.2329, com $r^2_{EMB,Urms}$=0.96, $r_{Emb,Urms}$=0.98, p<0.01, N_{Emb}=6; $u_{max,V,5I,Qr\leq142m3/s}$=-3.6673*$[U_{rms,5I}]^3$-0.2857, com $r^2_{5IB,Urms}$=0.82, $r_{5I,Urms}$=0.90, p<0.01, N_{5I}=6; $u_{max,V,Gala,Qr\leq42m3/s}$=-5.4207*$[U_{rms,Gala}]^3$-0.2088, com $r^2_{EMB,Urms}$=0.86, $r_{Gala,Urms}$=0.93, p<0.01, N_{Gala}=10; $u_{max,V,EE,Qr\leq160m3/s}$=-5.162*$[U_{rms,5I}]^3$-0.293, com $r^2_{EE,Urms}$=0.96, $r_{EE,Urms}$=0.98, N_{EE}=3. Na legenda, "Emb(BN)" representou o ciclo de maré, deslocado 100m para montante realizado no início do braço norte. Relações ocorridas entre as magnitudes das velocidades máximas da enchente e da vazante com a variação do parâmetro $(U_{rms})^3$. Na legenda, "Emb(BN)" representou o ciclo de maré, deslocado 100m para montante realizado no início do braço norte.

Para regimes fluviais baixos a moderados, as variações das magnitudes de $\overline{u}_{max.e}$ nas estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos foram praticamente explicadas pelo parâmetro $[U_{rms}]^3$, tendo descrito cerca de 98% da variabilidade de $\overline{u}_{max.e}$. Contudo, para a estação da Gala esta decresceu para os 68%. Quanto às variações das magnitudes das $\overline{u}_{max.v}$, a importância relativa da maré expressa sob a forma do parâmetro $[U_{rms}]^3$ foi muito elevada em todas as estações do estuário, tendo explicado pelo menos 86% da variabilidade de $\overline{u}_{max.v}$.

Da análise do gráfico a) da figura 5.3.3. 10, onde se relacionam as variações de $a_{\overline{u}}$ com o parâmetro ($[U_{rms}]^3$) de todos os ciclos de maré aferidos no estuário, verificou-se ter havido correlações muito boas, positivas e significativas para as estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos, descritas pelas equações 5.3. 35, 5.3. 36 e 5.3. 37. Estas relações descreveram para as estações do canal principal do estuário, quer um aumento da amplitude da variação da velocidade

sob marés de maiores $[U_{rms}]^3$, quer magnitudes de $a_{\bar{u},y}$ e coeficientes de determinação decrescentes para montante ($a_{\bar{u},Emb} > a_{\bar{u},5I} > a_{\bar{u},EE}$; $r^2_{Emb,Urms} > r^2_{5I,Urms} > r^2_{EE,Urms}$), que terão reflectido uma diminuição da importância relativa da maré na hidrodinâmica dos sectores mais interiores deste canal.

$$a_{\bar{u},Emb} = 0.2528 * \ln((U_{rms,Emb})^3) + 1.7692 \quad (5.3.35)$$

$$a_{\bar{u},Gala} = 0.206 * \ln((U_{rms,Gala})^3) + 1.6048 \quad (5.3.36)$$

$$a_{\bar{u},5I} = 0.2353 * \ln((U_{rms,5I})^3) + 1.6769 \quad (5.3.37)$$

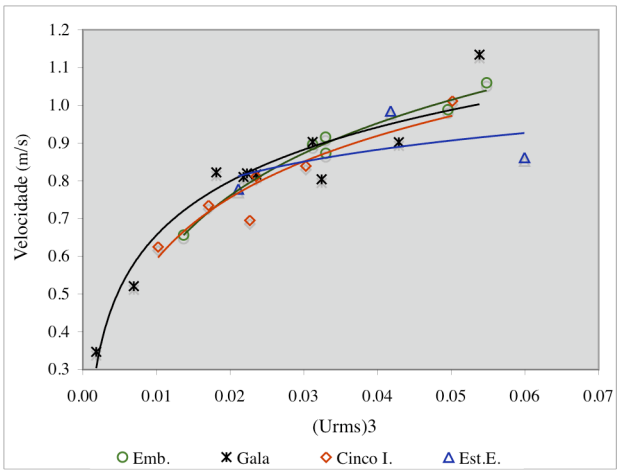
Quando relacionada a variação do parâmetro $[U_{rms}]^3$ com a variação da superfície livre, de acordo com o gráfico b) da figura 5.3.3. 10, verificou-se ter havido em todas as estações do estuário correlações boas e positivas. Destas, apenas foram significativas na Embocadura e na Gala, tendo sido representadas pelas equações 5.3. 38 e 5.3. 39, mas descreveram coeficientes de determinação decrescentes para as estações mais interiores do estuário.

$$[U_{rms,Emb}]^3 = 0.039 * \ln(A_{w,Emb}) + 0.0182 \quad (\text{para } 0.9 \le A_{w,Emb} \le 2.6\text{m e } Q_{r,Emb} \le 155\text{m}^3\text{/s}) \quad (5.3.38)$$

$$[U_{rms,Gala}]^3 = 0.0357 * \ln(A_{w,Gala}) + 0.0069 \quad (\text{para } 0.9 \le A_{w,Gala} \le 2.6\text{m e } Q_{r,Gala} \le 46\text{m}^3\text{/s}) \quad (5.3.39)$$

Para além de ter permitido relacionar directamente este parâmetro tradutor da força da maré com a variação da superfície livre, também permitiu descrever para os dois braços, decréscimos das magnitudes de $[U_{rms}]^3$ diferenciados para montante (com $[U_{rms,Emb}]^3 > [U_{rms,5I}]^3 > [U_{rms,Gala}]^3$). Para o leque de amplitudes da maré compreendidas entre os $0.9 \le A_w \le 2.6$m, a Embocadura apresentou um valor médio de $\left[\bar{U}_{rms,Emb}\right]^3 \approx 0.038$m/s que foi superior quer aos valores médios registados, na estação distanciada 6km no braço norte com $\left[\bar{U}_{rms,5I}\right]^3 \approx 0.028$m/s, quer na estação do braço sul com $\left[\bar{U}_{rms,Gala}\right]^3 \approx 0.025$m/s, apenas distanciada da primeira por 1.5km. Estes, apontaram para taxas de decréscimo de apenas $\left[\bar{U}_{rms,y}\right]^3 \approx 0.002\text{ms}^{-1}$/km no braço norte e cinco vezes mais elevada para o sector distal do braço sul, com um valor da ordem dos $\left[\bar{U}_{rms,y}\right]^3 \approx 0.01\text{ms}^{-1}$/km. Assim, estes resultados traduziram-se num decréscimo distinto da força da componente horizontal da maré nos dois braços do estuário, que por ter sido mais pequeno no canal principal, reflectiu uma maior propagação da maré.

a)



b)

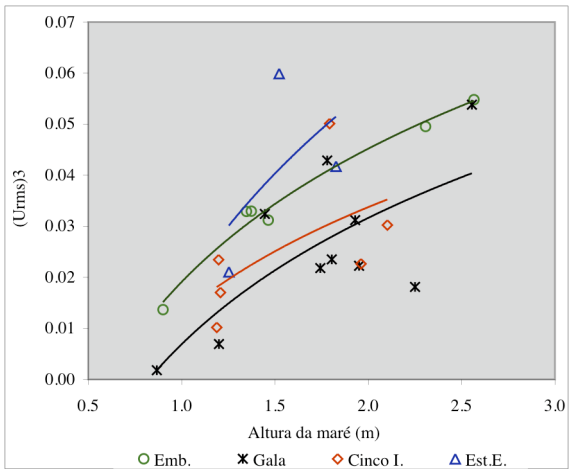


Figura 5.3.3. 10. No gráfico a) definem-se as tendência de variação obtidas entre a amplitude da velocidade média (a_u) com o parâmetro $(U_{rms})^3$. Foram obtidas as seguintes regressões: $a_{u,Emb}=0.2528*\ln((U_{rms,Emb})^3)+1.7692$ com $r^2_{Emb,Urms}=0.98$, $r_{Emb,Urms}=0.99$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $a_{u,Gala}=0.206*\ln((U_{rms,Gala})^3)+1.6048$ com $r^2_{Gala,Urms}=0.91$, $r_{Gala,Urms}=0.96$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; $a_{u,5I}=0.2353*\ln((U_{rms,5I})^3)+1.6769$ com $r^2_{5I,Urms}=0.88$, $r_{5I,Urms}=0.94$, $p<0.01$, $N_{5I}=6$; $a_{u,EE}=0.1095*\ln((U_{rms,5I})^3)+1.2348$ com $r^2_{EE,Urms}=0.31$, $r_{EE,Urms}=0.56$, $N_{EE}=3$. No gráfico b) projectam-se as regressões ocorridas entre a variação de $(U_{rms})^3$ e a altura da maré, tendo-se definido as seguintes equações de regressão: $[U_{rms,Emb}]^3=0.039*\ln(A_{w,Emb})+0.0182$, com $r^2_{Emb,Aw}=0.98$, $r_{Emb,Aw}=0.99$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$ (para $0.9\leq A_{w,Emb}\leq 2.6$m e $Q_{r,Emb}\leq 155$m^3/s); $[U_{rms,5I}]^3=0.0301*\ln(A_{w,5I})+0.0129$, com $r^2_{5I,Aw}=0.35$, $r_{5I,Aw}=0.59$, $p>0.05$, $N_{5I}=6$; $[U_{rms,EE}]^3=0.0566*\ln(A_{w,EE})+0.0174$, com $r_{EE,Aw}=0.30$, $r_{EE,Aw}=0.55$, $N_{EE}=3$; $[U_{rms,Gala}]^3=0.0357*\ln(A_{w,Gala})+0.0069$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.52$, $r_{Gala,Aw}=0.72$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$ (para $0.9\leq A_{w,Gala}\leq 2.6$m e $Q_{r,Gala}\leq 46$m^3/s). Na legenda, "Emb.", "Gala", "5I." e "EE." representaram os resultados obtidos em todos os ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e na Estação Elevatória. Estas variáveis foram consideradas independentes com $1.5<t_{DW}<2.4$. Foram definidas tendências de variação directas e proporcionais entre estas variáveis.

Entre a Estação Elevatória e os Cinco Irmãos, quando relacionados os ciclos de maré regidos apenas por descargas médias do Mondego inferiores a 100m^3/s, verificou-se ter havido um decréscimo do parâmetro $\left[\bar{U}_{rms}\right]^3$ para montante, que foi tendencialmente mais elevado sob marés de maior amplitude, como se ilustra no gráfico b) a figura 5.3.3. 10. Contudo, sob regimes do Mondego mais elevados $109\leq Q_{r,Mondego}\leq 160$m^3/s esta tendência inverteu-se, passando a descrever um aumento relativo deste parâmetro para a estação Elevatória, que terá reflectido uma forte distorção fluvial da componente horizontal dos escoamentos favorável à vazante, e também fomentada pela fisiografia artificial deste troço de canal, mais distante da foz do estuário (Duarte *et al*, 2000).

5.3.4. Circulação de Volumes no Estuário

Neste item, estudou-se a variação dos volumes líquidos em circulação nos diferentes sectores do estuário, quer durante as fases da enchente, quer durante as de vazante e determinaram-se os prismas de maré tendo por base as séries de dados hidrográficos com a duração de ciclos completos de maré. Calcularam-se para tal, os volumes totais das fases da enchente ($V_{e,PM}$) e da vazante (V_v), bem como, os volumes de enchente referentes apenas à secção da baixa-mar ($V_{e,BM}$). Com os resultados obtidos foi possível estimar os volumes referentes ao prisma de maré (**P**) e aos volumes fluviais (V_r) recorrendo aos procedimentos descritos no Capítulo 4. Os diferentes tipos de volumes estudados no estuário foram relacionados com a variação da superfície livre, com as descargas fluviais, e com os parâmetros ($\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{BM}$) e $(U_{rms})^3$, tendo sido constatadas várias tendências de variação destes quer para as quatro estações do estuário, quer para diferentes quadros hidrodinâmicos.

5.3.4.1. Volumes de Vazante

Para os diferentes ciclos de maré estudados no estuário foram determinados os volumes das fases da vazante (V_v) e relacionados com os principais agentes hidrodinâmicos em análise. Foi possível constatar que em todas as estações, os volumes V_v descreveram tendências de variação directas e proporcionais quer com as descargas fluviais, quer com a variação da altura da maré, de acordo com a análise da figura 5.3.4. 1. Foram obtidas regressões múltiplas significativas entre V_v com Q_r e com A_w para as estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos, representadas pelas expressões 5.3. 1, 5.3. 2 e 5.3. 3.

$$V_{v,Emb}=1.0x10^7+1246072*A_{w,Emb}+32845.75*Q_{r,Emb} \text{ (para } Q_{r,Emb}\leq 155m^3/s \text{ e } 0.9\leq A_{w,Emb}\leq 2.5m) \quad (5.3.\ 1)$$

$$V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=-79388.9+1450487*A_{w,Gala}+50156.734*Q_{r,Gala} \text{ (para } Q_{r,Gala}\leq 46m^3/s \text{ e } 0.9\leq A_{w,Gala}\leq 2.5m) \quad (5.3.\ 2)$$

$$V_{v,5I}=1412015+1902626*A_{w,5I}+19299{,}48*Q_{r,5I} \text{ (para } Q_{r,5I}\leq 142m^3/s \text{ e } 1.1\leq A_{w,5I}\leq 2.1m) \quad (5.3.\ 3)$$

Para os quadros hidrodinâmicos amostrados nestas estações, representados por $0.9\leq A_w\leq 2.5m$ e por $Q_{r,Mondego}\leq 155m^3/s$ e $Q_{r,Pranto}\leq 42m^3/s$, verificou-se que foram registados volumes

de vazante compreendidos entre os $8.4x10^6 \leq V_{v,Emb} \leq 12.3x10^6 m^3$, $2.3x10^6 \leq V_{v,Gala} \leq 4.7x10^6 m^3$ e os $3.9x10^6 \leq V_{v,5I} \leq 8.4x10^6 m^3$, que definiram volumes médios da ordem dos $\overline{V}_{v,Emb} \approx 10.3x10^6 m^3$, $\overline{V}_{v,Gala} \approx 3.6x10^6 m^3$ e de $\overline{V}_{v,5I} \approx 6.3x10^6 m^3$, respectivamente. Tornou-se possível verificar que os volumes médios de vazante registados na estação da Embocadura foram praticamente iguais à soma dos volumes provenientes do braço norte com os do braço sul, com $\overline{V}_{v,Emb} \approx \overline{V}_{v,5I} + \overline{V}_{v,Gala}$, tanto que, à semelhança do demonstrado anteriormente no subcapítulo 5.2, os volumes geométricos dos dois braços foram muito semelhantes. Desta forma, a componente dos volumes de vazante aferidos na Embocadura provenientes do canal principal do Mondego ($V_{v,CP}$), foram estimados considerando $V_{v,CP} \approx V_{v,Emb} - V_{v,Gala}$, tendo igualmente assumido que os volumes de vazante registados na Gala foram representativos dos volumes drenados pelo braço sul, com $V_{v,Gala} \approx V_{v,BS}$. Uma vez que as magnitudes dos caudais do Mondego registadas no campo foram muito superiores às magnitudes do Pranto, estimaram-se os volumes $V_{v,CP}$, considerando as regressões múltiplas, significativas, anteriormente descritas e referentes às estações da Embocadura e da Gala, tendo-se obtido a expressão significativa 5.3.4. 4, definida por $r_{Aw,Qr,CP}=0.85$, $r^2_{Aw,Qr,CP}=0.72$, $t_{D\text{-}w Aw,Qr,CP}=1.9$, $p<0.10$, $N_{CP}=6$.

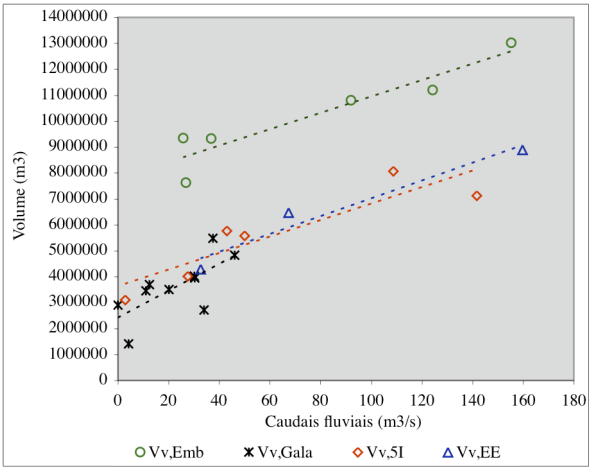
$$V_{v,CP}=6532895-1170693*A_{w,Emb}+28307.44*Q_{r,Emb} \text{ (para } Q_{r,Mondego} \leq 155 m^3/s \text{ e } 0.9 \leq A_w \leq 2.5m) \quad (5.3.4)$$

Os resultados assim estimados, apontaram para que as magnitudes da fracção dos volumes de vazante medidos na Embocadura provenientes do canal principal do Mondego, tenham estado compreendidos entre os $6.1x10^6 \leq V_{v,CP} \leq 7.6x10^6 m^3$, e tenham sido representativos de um valor médio da ordem dos $\overline{V}_{v,CP} \approx 6.7x10^6 m^3$. Desta forma, os volumes do braço sul ($V_{v,BS}$) foram muito mais pequenos aos que circularam no canal principal ($V_{v,CP}$) tendo ambos representado em média respectivamente 34% e 66% dos volumes de vazante $V_{v,Emb}$, para as condições hidrodinâmicas em estudo.

Na estação Elevatória, os três ciclos de maré analisados, permitiram unicamente definir uma tendência de variação apenas com $Q_{r,EE}$, que se encontra representada na figura 5.3.4. 1. Estes resultados apontaram para que os volumes da fase da vazante neste sector interior do estuário

tivessem sido fundamentalmente regulados pela variabilidade das descargas do Mondego, tendo a acção da maré tido um efeito reduzido.

a)



b)

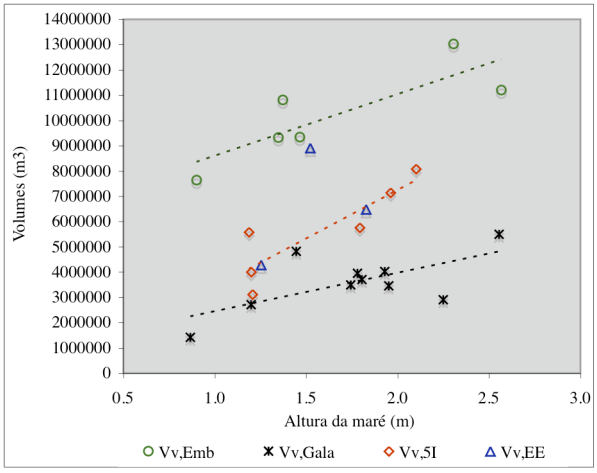


Figura 5.3.4. 1. Tendências de variação definidas entre os volumes de vazante (V_v) e os principais agentes hidrodinâmicos, nas diferentes estações do estuário. No gráfico a) relaciona-se V_v com as descargas fluviais (Q_r), enquanto no gráfico b) confronta-se V_v com a variação da altura da maré (A_w). Na legenda $V_{v,Emb}$, $V_{v,5I}$, $V_{v,Gala}$ e $V_{v,EE}$ representaram os volumes de vazante registados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos, Gala e estação Elevatória. Dos resultados obtidos, destaca-se que os volumes de vazante registados nas diferentes estações apresentaram variações directas e proporcionais às variações de A_w e de Q_r. As regressões múltiplas obtidas entre V_v com Q_r e com A_w nas diferentes estações foram descritas por: $V_{v,Emb}=1.0x10^7+1246072*A_{w,Emb}+32845.75*Q_{r,Emb}$, com $r_{Aw,Qr,Emb}=0.79$, $r^2_{Aw,Qr,Emb}=0.63$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Emb}=1.92$, $p<0.10$, $N_{Emb}=6$; por $V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=-79388.9+1450487*A_{w,Gala}+50156.734*Q_{r,Gala}$, com $r_{Aw,Qr,Gala}=0.95$, $r^2_{Aw,Qr,Gala}=0.90$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Gala}=1.7$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; $V_{v,5I}=1412015+1902626*A_{w,5I}+19299{,}48*Q_{r,5I}$, com $r_{Aw,Qr,5I}=0.93$, $r^2_{Aw,Qr,5I}=0.869$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,5I}=1.3$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$. Os testes de Durbin-Watson atestaram a independência destas variáveis ($1.8\leq t_{DW}\leq 2.4$). A regressões simples definidas no gráfico a) foram descritas por: $V_{v,Emb}=31621+Q_{r,Emb}+7.79x10^6$, $r^2_{Qr,Emb}=0.88$, $r_{Qr,Emb}=0.94$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=51950+Q_{r,Gala}+2.42x10^6$, $r^2_{Qr,Gala}=0.50$, $r_{Qr,Gala}=0.71$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$; $V_{v,5I}=31842+Q_{r,5I}+3.63x10^6$, $r^2_{Qr,5I}=0.81$, $r_{Qr,5I}=0.90$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$ e por $V_{v,EE}=34236+Q_{r,EE}+3.6x10^6$, $r^2_{Qr,EE}=0.95$, $r_{Qr,EE}=0.97$, $N_{EE}=3$, enquanto no gráfico b) por: $V_{v,Emb}=2.42x10^6+A_{w,Emb}+6.19x10^6$; $r^2_{Aw,Emb}=0.69$, $r_{Aw,Emb}=0.83$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; $V_{v,Gala}\approx V_{v,BS}=1.53x10^6+A_{w,Gala}+9.19x10^6$; $r^2_{Aw,Gala}=0.44$, $r_{Aw,Gala}=0.66$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$ e por $V_{v,5I}=3.84x10^6+A_{w,5I}-4.27x10^5$; $r^2_{Aw,5I}=0.77$, $r_{Aw,5I}=0.88$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$.

Quando analisados os coeficientes de determinação definidos pelas regressões simples significativas referentes às estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos, foi possível verificar que a variabilidade dos volumes de vazante foi explicada respectivamente em 88%, 50% e 81% pelas descargas fluviais, contra apenas 69%, 44% e 77% da variabilidade explicada por A_w. Desta forma, estes resultados apontaram para que os volumes V_v no estuário tenham sido maioritariamente regulados pelas descargas fluviais, quer do Mondego, quer do Pranto, muito embora a variação da altura da maré também tenha interferido, mas com uma menor importância relativa. Também se aferiu destes resultados, que na estação mais proximal do canal principal do estuário, os $V_{v,EE}$ foram

regulados fundamentalmente pelos caudais do Mondego, explicando estes aproximadamente 95% da variabilidade de $V_{v,EE}$. Analisados os coeficientes de determinação das regressões múltiplas, constatou-se que a variação dos caudais fluviais e da altura da maré explicaram em conjunto 63% e 90% da variabilidade de V_v, respectivamente para os braços norte e sul.

5.3.4.2. Volumes de Enchente

Na figura 5.3.4. 2 relacionam-se os volumes totais da fase da enchente ($V_{e,PM}$) com a variação da altura da maré, para os diferentes sectores do estuário. Da sua análise, verificou-se que os $V_{e,PM}$ mostraram correlações bem definidas e distintas, quer em diferentes estações do estuário, quer sob diferentes quadros de descargas fluviais.

Relações de $V_{e,PM}$ com a Variação da Altura da Maré

Quando analisadas as correlações obtidas apartir de volumes de enchente referentes aos ciclos de maré regidos por baixos caudais fluviais (inferiores a $Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s$ ou a $Q_{r,Pranto} \leq 46 m^3/s$) verificou-se que nas estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos as regressões obtidas foram positivas, mas significativas apenas nas duas primeiras, descritas pelas equações 5.3. 5 e 5.3. 6, como se ilustra na figura 5.3.4. 2. Na estação Elevatória não se registou qualquer regressão entre $V_{e,PM,EE}$ e $A_{w,EE}$, sugerindo uma importância relativa muito pequena por parte da maré na variação dos volumes de enchente deste sector mais proximal do estuário.

Para as condições hidrodinâmicas amostradas na Gala (de $0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.6m$ e $Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$), registaram-se volumes de enchente compreendidos entre os $1.3x10^6 \leq V_{e,PM,Gala} \leq 3.8x10^6 m^3$, que definiram um valor médio de $\overline{V}_{e,PM,Gala,Qr \leq 46m3/s} \approx 2.5x10^6 m^3$. Na estação da Embocadura os volumes registados encontraram-se compreendidos entre os $6.3x10^6 \leq V_{e,PM,Emb} \leq 11.7x10^6 m^3$ e definidos por um valor médio de $\overline{V}_{e,PM,Emb,Qr \leq 37m3/s} \approx 9.0x10^6 m^3$.

$$V_{e,PM,Gala} = V_{e,BS} = 1.47x10^6 * A_{w,Gala} + 7606 \quad (\text{para } Q_{r,Pranto} \leq 46 m^3/s) \qquad (5.3.5)$$

$$V_{e,PM,Emb} = 3.17x10^6 * A_{w,Emb} + 3.48x10^6 \quad (\text{para } Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s) \qquad (5.3.6)$$

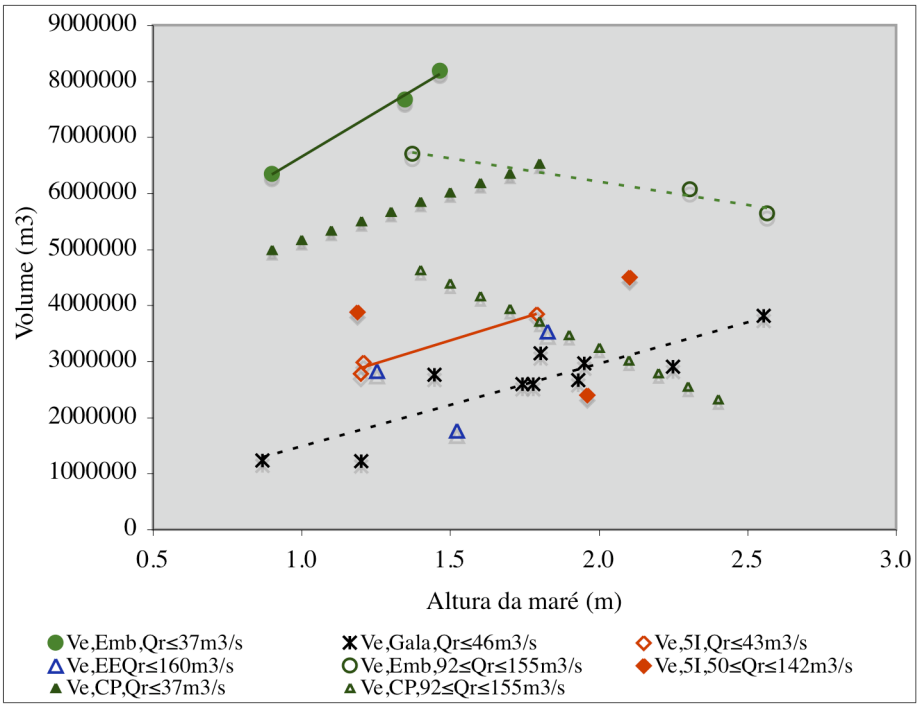


Figura 5.3.4. 2. Regressões entre os volumes de enchente ($V_{e,PM}$) e a variação da altura da maré (A_w) para as diferentes estações estudadas no estuário. Foram definidas pelas seguintes equações: $V_{e,PM,Emb,Qr\leq37m3/s}=3.17x10^6*A_{w,Emb}+3.48x10^6$, com $r_{Aw,Emb}=0.997$, $r^2_{Aw,Emb}=0.99$, $p<0.05$, $N_{Emb}=3$; $V_{e,PM,Emb,92\leq Qr\leq155m3/s}=-8.24x10^5*A_{w,Emb}+7.8x10^6$, com $r_{Aw,Emb}=0.98$, $r^2_{Aw,Emb}=0.96$, $N_{Emb}=3$; $V_{e,PM,5I,Qr\leq43m3/s}=1.63x10^6*A_{w,5I}+9.17x10^5$, com $r_{Aw,5I}=0.985$, $r^2_{Aw,5I}=0.97$, $N_{5I}=3$; $V_{e,PM,Gala,Qr\leq46m3/s}\approx V_{e,BS}=1.47x10^6*A_{w,Gala}+7606$, com $r_{Aw,Gala}=0.896$, $r^2_{Aw,Gala}=0.80$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$. Estas regressões definiram testes de Durbin-Watson fundamentaram a independência das variáveis, com $1.9\leq t_{DW}\leq2.3$. Os volumes de enchente tenderam a aumentar proporcionalmente com a altura da maré e inversamente com o aumento das descargas fluviais.

Comparados os $V_{e,PM}$ obtidos netas duas estações, apurou-se que os volumes de enchente no braço sul ($V_{e,PM,BS}$) representaram em média 29% dos $V_{e,PM,Emb,Qr\leq37m^3/s}$ e foram aproximadamente 40% mais pequenos que os volumes que se propagaram ao longo do canal principal do estuário ($V_{e,PM,CP}\approx V_{e,PM,Emb}-V_{e,PM,Gala}$). As magnitudes de $V_{e,PM,CP}$ seguiram com $A_{w,Emb}$ uma distribuição do tipo linear, significativa, representada por 5.3. 7 e que resultou da diferença dos volumes das expressões 5.3. 6 com 5.3. 5. Aquela expressão, descreveu volumes de enchente mais elevados aos registados no braço sul, com $5.0x10^6\leq V_{e,PM,CP,Qr\leq37m3/s}\leq7.8x10^6 m^3$, tendo apontado também para um incremento relativo de $V_{e,PM,CP}$ em função de A_w, superior.

Estimados os $V_{e,PM}$ referentes ao troço de canal correspondente ao braço norte, com $V_{e,PM,BN}=\overline{V}_{e,PM,Emb,Qr\leq37m3/s}-(\overline{V}_{e,PM,Gala}+\overline{V}_{e,PM,5I})\approx2.6x10^6 m^3$ constatou-se que foram pouco mais elevados do que os estimados para o braço sul, tendo estes apresentado diferenças médias da ordem dos 3%.

$$V_{e,PM,CP}=1.70x10^{6}+A_{w,Emb}+3.47x10^{6} \text{ (para } Q_{r,Mondego}\leq 37m^{3}/s) \quad (5.3.7)$$

Quando analisados os caudais mais elevados do Mondego, compreendidos entre os $92\leq Q_{r,Emb}\leq 155m^{3}/s$, verificou-se na estação da Embocadura, que a regressão obtida entre $V_{e,PM,Emb}$ e $A_{w,Emb}$ passou a ser negativa, mas não significativa, de acordo com o gráfico da figura 5.3.4. 2. Esta regressão, definiu uma tendência de decréscimo relativo dos volumes $V_{e,PM,Emb}$ mesmo sob marés vivas, que terá estado relacionada com o amortecimento da componente horizontal da maré durante a fase da enchente, gerado pelos caudais do Mondego que se propagaram em sentido contrário. Estes volumes apresentaram magnitudes compreendidas entre os $6.7x10^{6}\geq V_{e,PM,Emb}\geq 5.7x10^{6}m^{3}$, para marés de $1.4\leq A_{w,Emb}\leq 2.6m$ e caudais fluviais compreendidos entre os $92\leq Q_{r}\leq 155m^{3}/s$. A variação de $V_{e,PM,Emb}$ passou a descrever uma taxa de decréscimo média de $V_{e,PM,Emb}$ da ordem dos $1.3x10^{5}m^{3}$ por cada incremento médio de $10m^{3}/s$ nos caudais do Mondego, por cada ciclo de maré. A este amortecimento ocorrido nos $V_{e,PM,Emb,92\leq Qr\leq 155m3/s}$ que se propagaram pelo braço norte, ter-lhe-á estado igualmente associado um deslocamento de parte destes para o braço sul, na Embocadura, em resultado da oposição causada pelos caudais do Mondego que se propagaram com maior intensidade pelo sector norte desta estação, e que terão sido contrabalançados com a entrada preferencial da maré pelo sector sul deste canal. Uma vez que a propagação destas massas de água de sentidos contrários se processou preferencialmente por sectores transversalmente opostos no canal da Embocadura, assim uma parte da massa de água marinha que entrou pelo sector sul terá sido impelida para o braço sul, e por conseguinte ampliado os volumes de enchente medidos na estação da Gala, principalmente durante as marés vivas (e sob descargas do Mondego aproximadamente superiores a $Q_{r,Emb}\geq 92m^{3}/s$).

Relações de $V_{e,PM}$ com as Descargas Fluviais

Quando relacionados os $V_{e,PM}$ com as descargas fluviais, de acordo com o gráfico da figura 5.3.4. 3, verificou-se terem ocorrido apenas regressões bem definidas nas estações da Embocadura e Elevatória, que definiram tendências de variação de $V_{e,PM}$ inversamente proporcionais a Q_r. Na Embocadura a taxa de decréscimo média de $V_{e,PM,Emb}$ foi da ordem dos $1.2x10^5 m^3$ por cada incremento de $10m^3/s$ dos caudais do Mondego, tendo esta sido muito semelhante à registada anteriormente com $V_{e,PM,Emb,92\leq Qr\leq 155m^3/s}$, quando relacionada com $A_{w,Emb}$. Os volumes $V_{e,PM,Gala}$ passaram a representar 42% dos volumes registados na Embocadura, e relativamente aos $V_{e,PM,CP}$, passaram a apresentar magnitudes relativas tendencialmente mais elevadas, passando mesmo a ser superiores sob marés de $A_{w,Emb}\geq 2.1m$ e caudais $Q_{r,Emb}\geq 124m^3/s$ (figura 5.3.4. 3).

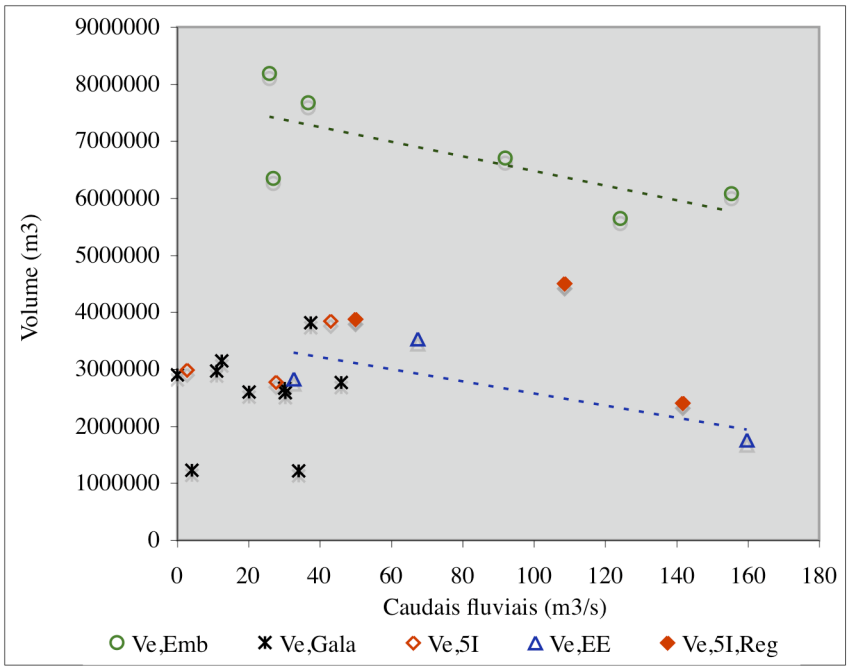


Figura 5.3.4. 3. Variação dos volumes de enchente ($V_{e,PM}$) em circulação nas diferentes estações do estuário: a) regressões obtidas entre $V_{e,PM}$ e A_w; b) regressões obtidas entre $V_{e,PM}$ e Q_r. As regressões obtidas foram definidas por $V_{e,PM,Emb,Qr\leq 155m3/s}=-1.28x10^4*Q_{r,Emb}+7.7x10^6$, com $r_{Qr,Emb}=0.73$, $r^2_{Qr,Emb}=0.53$, $N_{Emb}=6$ e por $V_{e,PM,EE,Qr\leq 160m3/s}=-1.06x10^4*Q_{r,EE}+3.6x10^6$, com $r_{Qr,EE}=0.78$, $r^2_{Qr,Emb}=0.61$, $N_{EE}=3$. Os testes de Durbin-Watson atestaram a independência destas variáveis, com $1.8\leq t_{DW}\leq 2.4$. Os volumes de enchente tenderam a decrescer de uma forma proporcional com o aumento da magnitude das descargas fluviais.

Da análise dos coeficientes de determinação obtidos nas regressões descritas anteriormente, foi possível estabelecer para as estações do sector distal do estuário, que os volumes de enchente foram fundamentalmente regulados pela maré, uma vez que cerca de 99% da variabilidade de $V_{e,PM}$

na Embocadura foi explicada pela variação da altura da maré sob regimes fluviais $Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s$, decrescendo aquela para os 96% sob descargas fluviais mais elevadas, da ordem dos $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$. Na estação do braço sul, cerca de 80% da variabilidade de $V_{e,PM,Gala}$ foi explicada apenas pela variação de $A_{w,Gala}$. Estes resultados para além de terem traduzido um domínio da maré no sector distal do estuário, permitiram ainda estimar os volumes totais das fases da enchente em função da variação da superfície livre, apenas sob caudais pequenos do Mondego. Na estação Elevatória apontaram para um domínio das descargas fluviais neste sector mais proximal do estuário.

Testadas as regressões múltiplas entre os volumes de vazante com os principais agentes de transporte em estudo, determinou-se que foram significativas no canal principal e na estação da Gala, com $r_{Aw,Qr,Gala}=0.76$, $r^2_{Aw,Qr,Gala}=0.81$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Gala}=1.7$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$ e com $r_{Aw,Qr,CP}=0.86$, $r^2_{Aw,Qr,CP}=0.85$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,CP}=1.9$, $p<0.10$, $N_{CP}=6$.

$$V_{v,Gala} = -99060+1464462*A_{w,Gala}+5350.57Q_{r,Gala} \quad (\text{para } Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s) \qquad (5.3.8)$$

$$V_{e,PM,CP} = 7396432-1081243A_{w,Emb}-16682.6*Q_r$$

5.3.4.3. Volumes de Enchente na BM

Para os diferentes ciclos de maré estudados no estuário, foram igualmente determinadas as fracções dos volumes de enchente que escoaram apenas na secção molhada referente à baixa-mar ($V_{e,BM}$), afim de possibilitar a determinação dos prismas de maré nas diferentes estações do estuário, assumindo que $\mathbf{P}=V_{e,PM}-V_{e,BM}$, de acordo com os autores Dyer & Taylor (1973); Officer & Crester, 1991, *in* Miranda *et al* (2002).

Testadas as regressões ocorridas entre $V_{e,BM}$ e os principais agentes hidrodinâmicos em análise, verificou-se que estes volumes descreveram tendências de variação muito semelhantes às descritas com $V_{e,PM}$, de acordo com os gráficos das figuras 5.3.4. 2 e 5.3.4. 4. Nas estações da Embocadura e da Gala as regressões obtidas foram muito boas e significativas, quer quando analisados apenas os quadros de regimes fluviais baixos, quer quando os regimes compreendidos

entre os $92 \leq Q_r \leq 155 m^3/s$. Sob baixos regimes fluviais (inferiores a $Q_{r,Emb} \leq 37 m^3/s$ e $Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$), registaram-se nestas estações regressões positivas, representadas pelas expressões 5.3. 9 e 5.3. 10, de acordo com o gráfico da figura 5.3.4. 4.

$$V_{e,BM,Emb} = 2.22x10^6 * A_{w,Emb} + 3.79x10^6 \quad (\text{para } Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s) \qquad (5.3.\ 9)$$

$$V_{e,BM,Gala} = V_{e,BS} \approx 541934 * A_{w,Gala} + 674907 \quad (\text{para } Q_{r,Pranto} \leq 46 m^3/s) \qquad (5.3.\ 10)$$

$$V_{e,BM,Emb} = -1.45x10^6 * A_{w,Emb} + 7.94x10^6 \quad (\text{para } 92 \leq Q_{r,Mondego} \leq 155 m^3/s) \qquad (5.3.\ 11)$$

$$V_{e,BM,CP} = 1.68x10^6 * A_{w,Emb} + 3.12x10^6 \quad (\text{para } Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s) \qquad (5.3.\ 12)$$

Para marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_w \leq 2.6m$, estas expressões permitiram estimar volumes de enchente compreendidos entre os $5.8x10^6 \leq V_{e,BM,Emb,Qr \leq 37 m^3/s} \leq 9.5x10^6 m^3$ para a Embocadura, e entre os $1.1x10^6 m^3 \leq V_{e,BM,Gala} \leq 2.1x10^6 m^3$ para a Gala, bem como, definir valores médios de $\overline{V}_{e,BM,Emb,Qr \leq 37m3/s} \approx 7.67x10^6 m^3$ e de $\overline{V}_{e,BM,Gala} \approx 1.62x10^6 m^3$, respectivamente. A fracção dos volumes registados na Embocadura, mas que se deslocaram ao longo do canal principal do estuário, foram estimados considerando $V_{e,BM,CP,Qr \leq 37 m^3/s} \approx V_{e,BM,Emb,Qr \leq 37 m^3/s} - V_{e,BM,Gala}$ = (eq.5.3. 9)-(eq.5.3. 10). Estes tiveram magnitudes compreendidas entre os $4.6x10^6 \leq V_{e,BM,CP,Qr \leq 37 m^3/s} \leq 7.48x10^6 m^3$, e volumes médios da ordem dos $\overline{V}_{e,BM,CP,Qr \leq 37m3/s} \approx 6.05x10^6 m^3$, de acordo com a expressão 5.3. 12. Verificou-se igualmente que os volumes registados no braço sul ($V_{e,BM,Gala} \approx V_{e,BM,BS}$) quando comparados com os $V_{e,CP,Qr \leq 37 m^3/s}$, foram mais pequenos, com magnitudes médias da ordem dos 27%.

Sob regimes do Mondego mais elevados ($92 \leq Q_r \leq 155 m^3/s$), constatou-se na estação da Embocadura, que a variação de $V_{e,Emb}$ passou a definir uma regressão negativa (equação 5.3. 11). Passou a descrever volumes compreendidos entre os $9.82x10^6 \leq V_{e,BM,Emb,92 \leq Qr \leq 155 m^3/s} \leq 11.7x10^6 m^3$, para $1.4 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6m$. Os volumes agora estimados para $V_{e,PM,CP,92 \leq Qr \leq 155 m^3/s}$, obtidos apartir da diferença das equações 5.3. 11 com 5.3. 12, passaram a definir um decréscimo destes para marés de maior amplitude, que se relacionou fundamentalmente com o facto de estas terem sofrido simultaneamente descargas do Mondego crescentes e as de maior magnitude, que foram capazes de

causar um efeito de amortecimento da componente horizontal da onda de maré durante a fase de enchente, ao longo do canal principal.

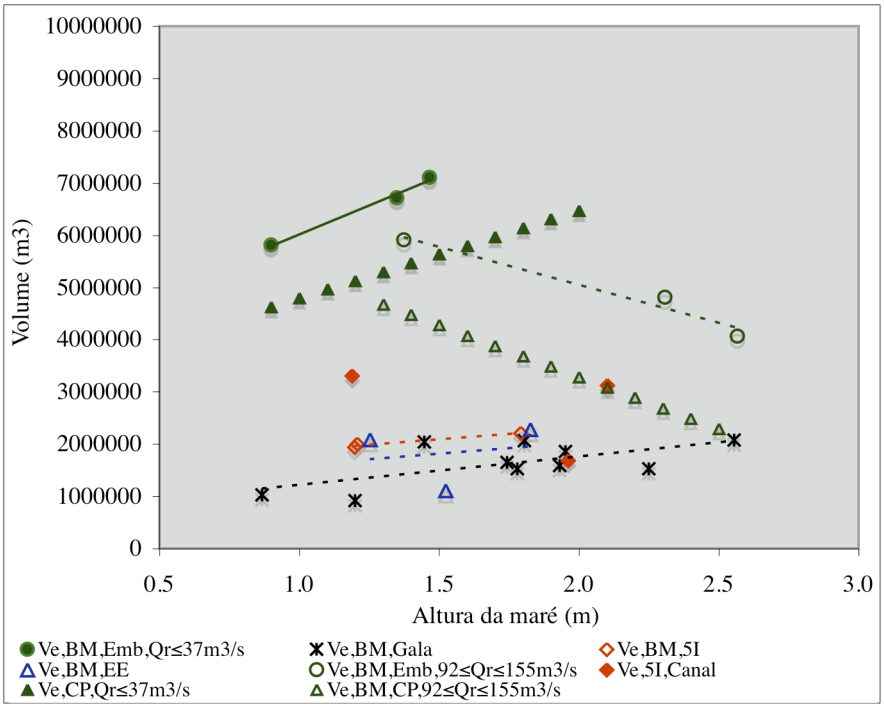


Figura 5.3.4. 4. Correlações obtidas entre os volumes de enchente referentes à secção molhada da BM ($V_{e,BM}$) e a variação da altura da maré nas quatro estações do estuário. Foram definidas por: $V_{e,BM,Emb,Qr\leq37m3/s}=2.22x10^6*A_{w,Emb}+3.79x10^6$, com $r_{Aw,Emb}=0.99$, $r^2_{Aw,Emb}=0.99$, $p<0.05$, $N_{Emb}=3$; por $V_{e,BM,Gala,Qr\leq46m3/s}=V_{e,BS}\approx541934*A_{w,Gala}+674907$, com $r_{Aw,Gala}=0.65$, $r^2_{Aw,Emb}=0.42$, $p<0.01$, $N_{Emb}=10$; por $V_{e,BM,Emb,92\leq Qr\leq155m3/s}=-1.45x10^6*A_{w,Emb}+7.94x10^6$, com $r_{Aw,Emb}=0.98$, $r^2_{Aw,Emb}=0.96$, $N_{Emb}=3$; e por $V_{e,BM,CP,Qr\leq37m3/s}=1.68x10^6*A_{w,Emb}+3.12x10^6$. As regressões apresentaram testes de Durbin-Watson de $1.9\leq t_{DW}\leq2.3$ que afirmaram a independência destas variáveis.

Confrontados os volumes de enchente ($V_{e,PM}$) com os volumes registados durante as fases de vazante (V_v), determinados nas diferentes estações do estuário, verificou-se que as magnitudes de V_v foram sempre superiores às de $V_{e,PM}$ em todas as séries de dados analisados.

5.3.4.4. Prismas de Maré

Os prismas de maré (**P**) determinados para cada série de dados hidrográficos obtidos nos diferentes sectores do estuário foram relacionados com diversos parâmetros maregráficos, tendo-se neste subcapítulo apenas analisado as regressões obtidas entre **P** e a variação média da superfície livre de cada ciclo de maré, representada pelo parâmetro ($\overline{h}_{PM}-\overline{h}_{PB}$), bem como, as regressões observadas entre **P** e o parâmetro $(U_{rms})^3$.

Relações de P com a Variação da Superfície Livre

Uma vez que a variação da altura da maré não entrou em consideração com a amplitude de variação média da superfície livre acontecida em toda a secção transversal do canal, de cada estação[1], considerou-se da maior importância, relacionar os prismas de maré aferidos no estuário com o parâmetro ($\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{BM}$), de acordo com o gráfico da figura 5.3.4. 5. As correlações obtidas entre **P** e ($\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{BM}$) para as diferentes estações do estuário, determinaram sob baixos regimes fluviais, regressões positivas, significativas nas estações da Embocadura, Gala, e Cinco Irmãos, representadas pelas equações 5.3. 13, 5.3. 14 e 5.3. 15. Na estação Elevatória definiu-se apenas uma tendência de variação positiva. As regressões obtidas entre **P** e a variação da altura da maré (A_w) para as diferentes estações do estuário, tendo estas expressado resultados muito semelhantes aos obtidos com ($\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{BM}$).

$$\mathbf{P}_{Emb} = 1.30x10^6*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb} - 5.24x10^5 = 9.55x10^5*A_{w,Emb} - 3.19x10^5 \text{ (para } Q_{r,Emb} \leq 37m^3/s) \quad (5.3.\ 13)$$

$$\mathbf{P}_{BS} \approx \mathbf{P}_{Gala} = 9.82x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Gala} - 6.62x10^5 = 9.31x10^5*A_{w,Gala} - 6.67x10^5 \text{ (para } Q_{r,Pranto} \leq 42m^3/s) \quad (5.3.\ 14)$$

$$\mathbf{P}_{5I} = 1.39x10^5 * (h_{PM}-h_{BM})_{5I} - 8.43x10^5 \text{ (para } Q_{r,5I} \leq 46m^3/s) \quad (5.3.\ 15)$$

$$\mathbf{P}_{CP} = 3.22x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb} + 1.38x10^5 = 2.44x10^4*A_{w,Emb} + 3.48x10^5 \text{ (para } Q_{r,Mondego} \leq 37m^3/s) \quad (5.3.\ 16)$$

$$\mathbf{P}_{CP} = -2.82x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb} + 6.09x10^5 = -3.12x10^5*A_{w,Emb} + 5.89x10^5 \text{ (para } 92 \leq Q_{r,Mondego} \leq 155m^3/s) \quad (5.3.\ 17)$$

A análise dos coeficientes de determinação obtidos, apontou para que mais de 98% da variabilidade de $\mathbf{P}_{Emb}$ e de $\mathbf{P}_{Gala}$ tenha sido explicada pela variação da superfície livre, e considerado um domínio da maré na regulação destes volumes de enchente nestas duas estações localizadas nos sectores distais dos canais mais importantes do estuário. Mesmo sob regimes do Mondego mais elevados ($92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155m^3/s$), a maré continuou a explicar 96% da variabilidade de $\mathbf{P}_{Emb}$, encontrando-se estes resultados concordantes com o inicialmente esperado.

[1]. Dado que a determinação de A_w em cada série de dados maregráficos foi feita apartir da média aritmética das três amplitudes de variação da superfície livre registadas nos três pontos de amostragem definidos, para cada estação do estuário.

A análise do gráfico da figura 5.3.4. 5, também permitiu verificar que os maiores volumes de **P** registados no estuário, localizaram-se na estação da Embocadura, sob baixos regimes fluviais ($Q_{r,Emb} \leq 37 m^3/s$), enquanto os menores volumes aconteceram na Gala.

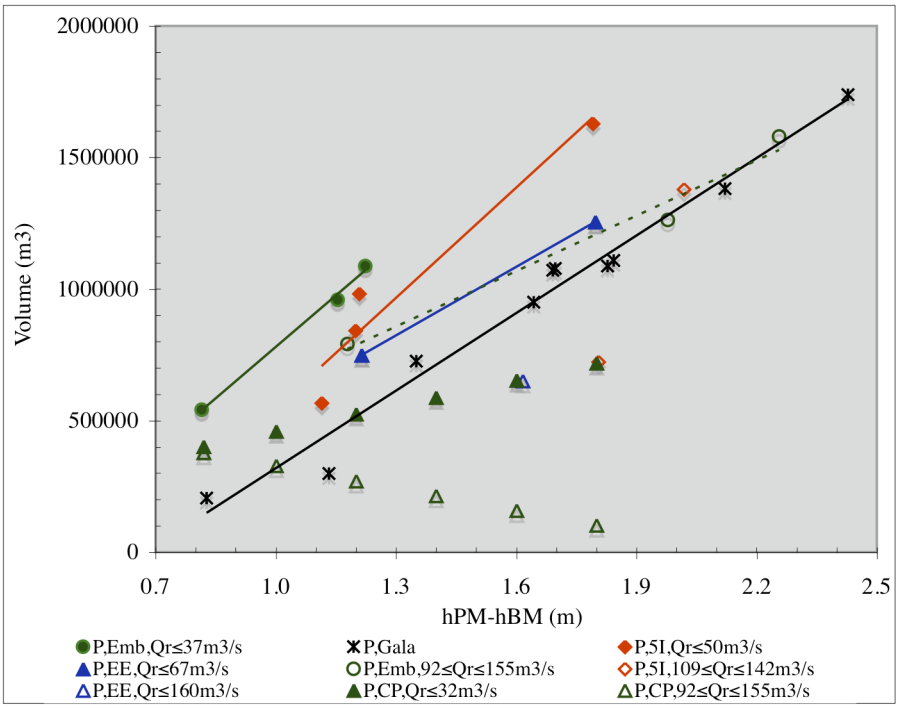


Figura 5.3.4. 5. Regressões obtidas entre os prismas de maré (**P**) e a variação da superfície livre média (h_{PM}-h_{BM}), para as diferentes estações do estuário. Foram descritas por: $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq37m3/s}=1.30x10^6*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb}-5.24x10^5=9.55x10^5*A_{w,Emb}-3.19x10^5$, com $r_{Emb}=0.998$, $r^2_{Emb}=0.996$, $p<0.05$, $N_{Emb}=3$; por $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq155m3/s}=7.0x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb}-52597$, com $r_{Emb}=0.987$, $r^2_{Emb}=0.98$, $N_{Emb}=3$; por $\mathbf{P}_{BS}\approx\mathbf{P}_{Gala}=9.82x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Gala}-6.62x10^5=9.31x10^5*A_{w,Gala}-6.67x10^5$, com $r_{Gala}=0.988$, $r^2_{Gala}=0.98$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; e por $\mathbf{P}_{5I,Qr\leq46m3/s}=1.39x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{5I}-8.43x10^5$, com $r_{5I}=0.97$, $r^2_{5I}=0.93$, $p<0.05$, $N_{5I}=4$. As regressões nos canais principais foram definidas por $\mathbf{P}_{CP,Qr\leq37m3/s}=3.22x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb}+1.38x10^5=2.44x10^4*A_{w,Emb}+3.48x10^5$, $\mathbf{P}_{CP,92\leq Qr\leq155m3/s}=-2.82x10^5*(h_{PM}-h_{BM})_{Emb}+6.09x10^5=-3.12x10^5*A_{w,Emb}+5.89x10^5$. Os testes de Durbin-Watson atestaram a independência das variáveis. Registaram-se prismas de maré mais elevados sob marés de maior amplitude.

As estações dos Cinco Irmãos e Elevatória localizadas ao longo do canal principal do estuário, com distâncias relativas à foz do estuário mais elevadas que as verificadas com a Gala, apresentaram prismas de maré mais elevados, sugerindo uma maior propagação da onda de maré pelo canal principal. Sob maiores descargas do Mondego, os $\mathbf{P}_{Emb,124\leq Qr\leq155m^3/s}$ passaram a apresentar volumes tendencialmente mais pequenos (acontecendo o mesmo com $\mathbf{P}_{5I,109\leq Qr\leq142m^3/s}$ e $\mathbf{P}_{EE,Qr=160m^3/s}$), atingindo nas condições de Q_r mais elevadas, magnitudes muito semelhantes às registadas na P_{Gala}, como se ilustra no gráfico da figura 5.3.4. 5.

Para as condições hidrodinâmicas amostradas na Embocadura e na Gala [2], os volumes dos prismas de maré apresentaram magnitudes compreendidas entre os $5.45x10^5 \leq \mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 37m^3/s} \leq 2.3x10^6 m^3$ na Embocadura e os $1.43x10^5 \leq \mathbf{P}_{Gala} \leq 1.50x10^6 m^3$ na Gala, tendo estes reflectido valores médios de $\overline{P}_{Emb,Qr\leq 37m3/s} \approx 1.43x10^5 m^3$ e de $\overline{P}_{Gala} \approx 8.10x10^5 m^3$, respectivamente. Sob regimes mais elevados do Mondego, da ordem dos $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, os $\mathbf{P}_{Emb}$ passaram a descrever volumes mais pequenos (em média 30% mais baixos), com magnitudes agora compreendidas entre os $5.22x10^5 \leq \mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155m^3/s} \leq 1.49x10^6 m^3$, e com $\overline{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155m3/s} \approx 9.98x10^5 m^3$. O decréscimo médio de $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155m^3/s}$ relativamente a $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 37m^3/s}$, foi da ordem dos $7.91x10^5 m^3$ por cada incremento de $10m^3/s$ nos caudais médios do Mondego (por ciclo de maré). Este comportamento de $\mathbf{P}_{Emb}$ também se relacionou com o facto de aquando das actividades de campo os ciclos de maré de maior amplitude, terem coincidido simultaneamente com os maiores regimes do Mondego.

Os prismas de maré que se propagaram pelo braço sul foram estimados tendo por base os **P** determinados na estação da Gala, considerando $\mathbf{P}_{BS} \approx \mathbf{P}_{Gala}$. Uma vez que a estação da Embocadura se localizou na confluência distal dos braços norte e sul do estuário, e à semelhança do considerado anteriormente com os volumes de enchente $V_{e,PM}$ e $V_{e,BM}$, a fracção dos prismas de maré que se propagaram pelo canal principal do estuário, foram estimados assumido $\mathbf{P}_{CP} = V_{e,PM,CP} - V_{e,BM,CP} \approx \mathbf{P}_{Emb} - \mathbf{P}_{Gala}$, tendo por base o princípio da continuidade de volume em cada ciclo completo de maré. Os resultados assim obtidos apontaram para magnitudes de $\mathbf{P}_{CP}$ compreendidas entre os $4.02x10^5 \leq \mathbf{P}_{CP,Qr\leq 37m^3/s} \leq 8.46x10^5 m^3$, com $\overline{P}_{CP,Qr\leq 37m3/s} \approx 6.21x10^5 m^3$ sob baixos regimes do Mondego, e magnitudes mais pequenas da ordem dos $3.79x10^5 \leq \mathbf{P}_{CP,92\leq Qr\leq 155m^3/s} \leq 0 m^3$, com $\overline{P}_{CP,92\leq Qr\leq 155m3/s} \approx 1.87x10^5 m^3$ sob descargas fluviais compreendidas entre os $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, considerando as equações de regressão significativas 5.3. 16 e 5.3. 17, respectivamente.

[2]. Com marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_w < 2.6m$, com $0.8 \leq (\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{PB}) < 2.3$, e sob descargas fluviais de $Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s$ e de $Q_{r,Pranto} \leq 46 m^3/s$.

Para marés de $A_w \leq 1.1m$, ou $(\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{PB}) \leq 1.2m$, verificou-se que os prismas $\mathbf{P}_{CP}$ foram superiores aos $\mathbf{P}_{BS}$, tendo representado em média 59% e 41%, respectivamente dos $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 37m^3/s}$. Sob caudais do Mondego mais elevados e compreendidos entre os $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155m^3/s$, registou-se um decréscimo relativo dos $\mathbf{P}_{Emb}$ (da ordem dos 17%), que se reflectiu apenas nos prismas de maré propagados pelo canal principal do estuário. Sob estas descargas do Mondego, os volumes dos prismas que se aferiram em $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155m^3/s}$, foram redistribuídos pelos dois canais do estuário, com percentagens relativas médias de ≈50% para $\mathbf{P}_{CP,92\leq Qr\leq 155m^3/s}$ e $\mathbf{P}_{BS,Qr\leq 46m^3/s}$, como se representa no quadro 5.3.4. 1. Para marés de maior amplitude, com $(\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{PB}) > 1.2m$ (ou $A_w > 1.1m$), verificou-se que os $\mathbf{P}_{BS}$ passaram a apresentar magnitudes relativas mais elevadas que as dos $\mathbf{P}_{CP}$, dado que os primeiros descreveram um aumento de $\mathbf{P}_{BS}$ em função da variação da superfície livre mais elevado de acordo com o gráfico da figura 5.3.4. 5.

A análise da variabilidade bissemanal dos prismas de maré, permitiu também identificar para os dois canais mais relevantes do estuário no sector da embocadura, que os $\mathbf{P}_{CP}$ foram em média superiores aos $\mathbf{P}_{BS}$ durante as marés mortas (com $A_w < 1.6m$, ou $(\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{PB}) < 1.5m$), tendo os primeiros representado em média 54% dos primas de maré aferidos na estação da Embocadura, enquanto os $\mathbf{P}$ do braço sul representaram 46% de $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 37m^3/s}$. Para as marés vivas, descritas por $A_w \geq 1.6m$, ou $(\overline{h}_{PM} - \overline{h}_{PB}) \geq 1.5m$, os resultados obtidos apontaram para que se tenha verificado um aumento relativo dos $\mathbf{P}_{BS}$ mais elevado ao registado nos $\mathbf{P}_{CP}$, tendo estes prismas representado, em média 62% e 38% dos prismas de $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 37m^3/s}$. Aquando de regimes do Mondego elevados ($92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155m^3/s$), constatou-se um decréscimo destes volumes de enchente apenas na estação da Embocadura, que foi em média da ordem dos 21% para as marés mortas e da ordem dos 35% para as marés vivas, mas também se verificou que os $\mathbf{P}_{Gala}$ continuaram a apresentar a mesma tendência de variação, directa e linear com $A_{w,Gala}$. Assim, este decréscimo de $\mathbf{P}_{Emb}$ reflectiu-se unicamente na redução dos prismas que se propagaram pelo braço norte, tendo estes passado a representar em média 41% de $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155m^3/s}$ para as maré mortas e apenas 6% para as marés vivas. Os prismas de

$\mathbf{P}_{Gala}$ para este quadro hidrodinâmico, passaram a representar em média perto de 59% e de 94% das magnitudes dos prismas registados em $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155 m^3/s}$, para as marés mortas e vivas, respectivamente.

Quadro 5.3.4. 1. Prismas de maré médios aferidos nas estações da Embocadura ($\overline{P}_{Emb}$) e da Gala ($\overline{P}_{Gala}$) sob diferentes regimes fluviais do Mondego. Percentagens dos volumes de **P** registados na Embocadura que se propagaram pelo canal principal do estuário ($\%\ \overline{P}_{CP}$) e pelo braço sul ($\%\ \overline{P}_{BS}$).

	$\mathbf{Q_{r,Mondeg}}\leq 37 m^3/s$			$92\leq\mathbf{Q_{r,Mondego}}\leq 155$ m^3/s		
A_w $(h_{PM}-h_{BM})$	$0.9\leq\mathbf{A_w}\leq 1.1m$ $0.8\leq(h_{PM}-h_{BM})\leq 1.2m$	$0.9\leq\mathbf{A_w}<1.6m$ $0.8\leq(h_{PM}-h_{BM})<1.5m$ (marés mortas)	$1.6\leq\mathbf{A_w}\leq 2.6m$ $1.5<(h_{PM}-h_{BM})\leq 2.4m$ (marés vivas)	$0.9\leq\mathbf{A_w}\leq 1.1m$ $0.8\leq(h_{PM}-h_{BM})\leq 1.2m$	$0.9\leq\mathbf{A_w}<1.6m$ $0.8\leq(h_{PM}-h_{BM})\leq 1.5m$ (marés mortas)	$1.6\leq\mathbf{A_w}\leq 2.6m$ $1.5<(h_{PM}-h_{BM})\leq 2.4m$ (marés vivas)
$\overline{P}_{Emb}$	$788599m^3$	$916840m^3$	$1947109m^3$	$652397m^3$	$721262m^3$	$1274519m^3$
$\overline{P}_{Gala}$	$326333m^3$	$422917m^3$	$1198865m^3$	$326333m^3$	$422917m^3$	$1198865m^3$
$\%\ \overline{P}_{CP}$	59% de $\mathbf{P}_{Emb}$	54% de $\mathbf{P}_{Emb}$	38% de $\mathbf{P}_{Emb}$	50% de $\mathbf{P}_{Emb}$	41% de $\mathbf{P}_{Emb}$	6% de $\mathbf{P}_{Emb}$
$\%\ \overline{P}_{BS}$	41% de $\mathbf{P}_{Emb}$	46% de $\mathbf{P}_{Emb}$	62% de $\mathbf{P}_{Emb}$	50% de $\mathbf{P}_{Emb}$	59% de $\mathbf{P}_{Emb}$	94% de $\mathbf{P}_{Emb}$

Com estes resultados verificou-se que os prismas de maré registados nos canais principais do estuário, definiram taxas de variação de $\mathbf{P}_{BS}$ e $\mathbf{P}_{CP}$ directamente proporcionais à variação da superfície livre, que foram distintas entre si e mais elevadas no braço sul. Estas relacionaram-se em grande parte com as diferenças ocorridas na fisiografia dos dois braços do estuário e com as descargas fluviais. Os vastos ambientes intermareais representativos dos sectores médio-proximal do braço sul (localizados a montante da estação da Gala), propiciaram a entrada de grandes volumes de água durante as fases de enchente acima do nível da BM, ficando praticamente emersos durante as BM e submersos aquando das PM. A fisiografia do canal principal, antropizada, com um desenvolvimento longitudinal muito rectilíneo e com uma secção transversal praticamente trapezoidal, fomentou a entrada e a saída de maiores volumes de água durante as fases de enchente e vazante, mas com prismas de maré mais pequenos face à menor variação relativa da superfície livre. Estes resultados foram igualmente corroborados com o registo de uma amplitude de variação da superfície livre mais elevada no braço sul, determinada apartir das constituintes harmónicas calculadas por Baptista *et al* (1995). Este decréscimo relativo de $\mathbf{P}_{Emb,92\leq Qr\leq 155 m^3/s}$ registado aquando de maiores descargas do Mondego, ter-se-á relacionado com o amortecimento causado na componente horizontal da onda de maré durante as fases de enchente, resultante do gradiente

barotrópico longitudinal gerado ao longo do canal principal do estuário pelos caudais fluviais. Terá contribuído também o facto de se ter registado uma drenagem diferencial dos caudais do Mondego e do Pranto, respectivamente pelo canal principal e pelo braço sul do estuário, bem como, pelas descargas do Pranto terem sido muito mais pequenas, com magnitudes médias da ordem dos 10% relativamente às do Mondego, de acordo com Baptista *et al* (1995).

A regressão linear obtida para os Prismas de maré na estação da Gala foi representativa de quadros hidrodinâmicos muito diversificados, abrangendo marés vivas e/ou mortas sob a influência das maiores e menores descargas do Pranto ($Q_r \leq 46 m^3/s$). Contudo, os prismas de maré registados na Embocadura e nos Cinco Irmãos para as maré de maior amplitude (com $A_w \geq 2.25m$ ou ($\bar{h}_{PM} - \bar{h}_{PB}$)$\geq 2m$) decorreram simultaneamente sob as maiores descargas do Mondego ($92 \leq Q_r \leq 155 m^3/s$), pelo que as regressões obtidas não foram representativas de marés com $A_{w,Emb} \geq 2.25m$ sob baixos regimes do Mondego ($Q_r \leq 37 m^3/s$).

Testadas as regressões múltiplas entre os volumes de vazante com os principais agentes de transporte em estudo, determinou-se que foram significativas na Embocadura e na estação da Gala, com $r_{Aw,Qr,CP}=0.99$, $r^2_{Aw,Qr,Emb}=0.984$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Emb}=2.5$, $p<0.05$, $Emb_P=6$, e com $r_{Aw,Qr,Gala}=0.97$, $r^2_{Aw,Qr,Gala}=0.949$, $t_{D\text{-}w,Aw,Qr,Gala}=1.5$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$.

$$P_{Emb} = -4095.36+789472A_{w,Emb}-3574.01Q_{r,Emb} \text{ (para } Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s) \quad (5.3.18)$$

$$P_{Emb} = 15981.33+900319.3(h_{PM}-h_{BM})_{Emb}-3701*Q_{r,Emb} \quad (\text{para } Q_{r,Gala} \leq 155 m^3/s)$$

Relações de P com o Parâmetro $(U_{rms})^3$

No gráfico da figura 5.3.4. 6 relacionam-se os prismas de maré com a variação do parâmetro $(U_{rms})^3$. A sua análise permitiu identificar correlações positivas distintas para as estações em análise, tendo sido estatisticamente significativas as ocorridas na Embocadura, Gala e Cinco Irmãos, de acordo com as expressões 5.3. 19, 5.3. 20 e 5.3. 21. Na estação elevatória, o pequeno número de leituras permitiu apenas inferir uma tendência de variação, sob caudais médios do Mondego inferiores a $67 m^3/s$.

$$\mathbf{P}_{Emb}=2.33x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Emb}+203526 \quad (\text{para } Q_{r,Emb}\leq 155m^{3}/s) \qquad (5.3.19)$$

$$\mathbf{P}_{Gala}=2.37x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Gala}+384742 \quad (\text{para } Q_{r,Gala}\leq 46m^{3}/s) \qquad (5.3.20)$$

$$\mathbf{P}_{5I}=2.65x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Gala}+340567 \quad (\text{para } Q_{r,5I}\leq 142m^{3}/s) \qquad (5.3.21)$$

A análise deste gráfico permitiu constatar que os prismas de maré registados nas diferentes estações do estuário apresentaram variações com o parâmetro $(U_{rms})^3$, muito semelhantes entre si. As regressões significativas obtidas apontaram para que, marés de igual magnitude deste parâmetro, tenham ostentado os menores prismas de maré na estação da Embocadura, seguidos da Gala e por fim, os mais elevados nos Cinco Irmãos, ou seja, com magnitudes relativas de **P** crescentes para as estações mais interiores do estuário. Desta forma, foi possível relacionar quantitativamente os prismas de maré nestas estações, tendo por base um parâmetro hidrodinâmico relativo à componente horizontal da maré.

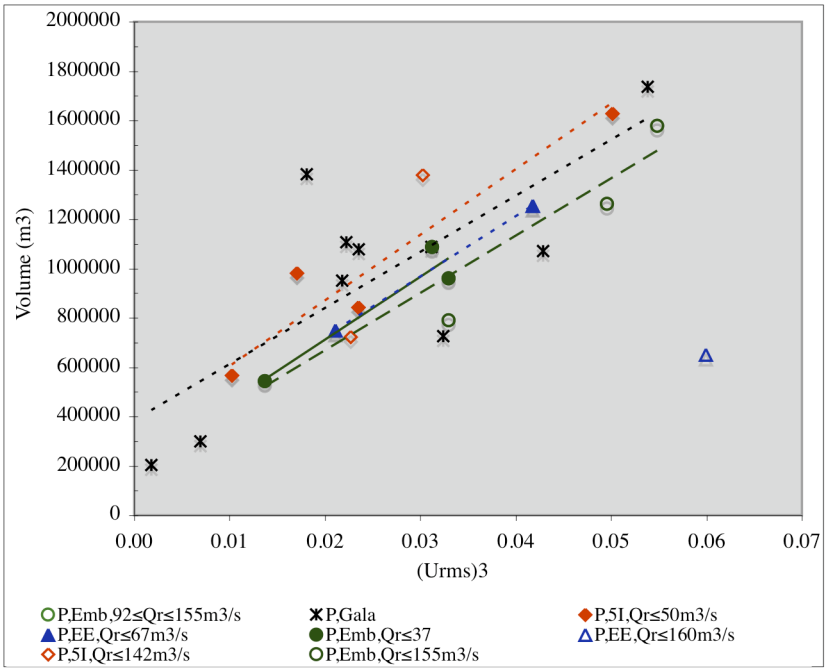


Figura 5.3.4. 6. Regressões entre os prismas de maré (**P**) e a variação do o parâmetro $(U_{rms})^3$ nas diferentes estações do estuário. Foram descritas pelas seguintes equações: $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 37m3/s}=2.55x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Emb}+201690$, com $r_{Emb}=0.95$, $r^2_{Emb}=0.91$, $N_{Emb}=3$; $\mathbf{P}_{Emb,Qr\leq 155m3/s}=2.33x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Emb}+203526$, com $r_{Emb}=0.94$, $r^2_{Emb}=0.88$, $p<0.01$, $N_{Emb}=6$; $\mathbf{P}_{Gala,Qr\leq 46m3/s}=2.37x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Gala}+384742$, com $r_{Gala}=0.77$, $r^2_{Gala}=0.59$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$; $\mathbf{P}_{5I,Qr\leq 142m3/s}=2.65x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Gala}+340567$, com $r_{5I}=0.90$, $r^2_{5I}=0.81$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; e por $\mathbf{P}_{EE}=2x10^{7}*(U_{rms})^{3}_{Gala}+236509$, com $N_{EE}=2$. Os valores de Durbin-Watson definiram a independência destas variáveis, com $1.7\leq t_{DW}\leq 2.5$. Os prismas de maré foram mais elevados sob marés de maior $(U_{rms})^3$.

Na Embocadura as regressões obtidas entre **P** e $(U_{rms})^3$ foram muito semelhantes, quando analisados apenas os $\mathbf{P}_{Emb}$ de baixos regimes do Mondego ($Q_r \leq 37 m^3/s$), quer os $\mathbf{P}_{Emb}$ associados a maiores descargas fluviais ($92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$).

A análise dos coeficientes de determinação obtidos, permitiu aferir que cerca de 88%, 81% e 59% da variabilidade de **P** tenha sido explicada por este parâmetro, nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos e Gala, respectivamente, tendo realçado uma importância relativa de $(U_{rms})^3$ na variação de **P** inferior à registada com a variação da superfície livre.

Comparação de Resultados

O gráfico da figura 5.3.4. 7 relaciona os prismas de maré estimados para o braço sul, obtidos no âmbito deste trabalho com os obtidos por Duarte *et al* (2002), em função da variação da superfície livre, para a estação da Gala. Constata-se da sua análise, que os resultados obtidos pelos dois métodos foram muito semelhantes entre si, tendo definido magnitudes de $\mathbf{P}_{BS}$ praticamente coincidentes sob marés de maior amplitude.

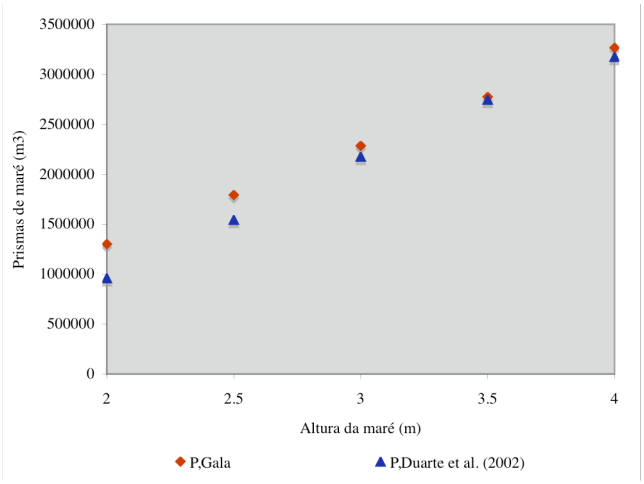


Figura 5.3.4. 7. Prismas de maré estimados para o braço sul em função da variação da superfície livre. Na legenda, "$\mathbf{P}_{,Gala}$" representam as magnitudes dos Prismas de maré determinados no âmbito deste trabalho na estação da Gala, enquanto "$\mathbf{P}_{,Duarte\ et\ al\ (2002)}$" representaram os prismas de maré numéricos determinados por Duarte *et al* (2002). As magnitudes dos prismas de maré determinados por estes dois métodos distintos foram praticamente coincidentes.

Realça-se o facto de as magnitudes dos $\mathbf{P}_{Gala}$ estimadas neste trabalho terem sido apenas fundamentadas em resultados de campo, que consistiram em leituras de velocidades efectuadas a diferentes profundidades e segundo a secção transversal do canal, localizada 50m a jusante da ponte

da Gala, e com medições irregularmente espaçadas no tempo ao longo de ciclos completos de maré. Enquanto os prismas de maré estimados por Duarte *et al* (2002), foram determinados recorrendo ao modelo numérico de diferenças finitas, designado de DUFLOW, em 1D, tendo apenas por condições de fronteira, resultados maregráficos obtidos apartir de perfis de velocidade obtidos junto à ponte da Gala, recorrendo à mesma metodologia. Desta forma, a semelhança dos resultados obtidos por estes dois métodos distintos, demonstra o grau de fiabilidade de ambos para a quantificação dos prismas de maré do braço sul, bem como, validam os pressupostos que o modelo numérico teve por base, de se terem verificado condições praticamente estacionárias e de o braço sul ter correspondido a um sistema bem misturado. Muito embora se não tenha conhecimento de resultados numéricos teóricos similares de $\mathbf{P}_{CP}$ referentes ao braço norte, determinados por outros autores, e uma vez que a metodologia adoptada para a estimação dos prismas de maré de campo do braço sul foi igual à adoptada na estação da Embocadura, tudo leva a considerar que aquando de condições similares estacionárias e de baixa estratificação (sob baixos regimes do Mondego), os resultados obtidos no estuário estejam igualmente coerentes com os obtidos com recurso a modelos numéricos ou com base cartográfica.

Os modelos propostos por Johnson (1972, *in* Jarret 1976) usados para a estimação do prisma de maré, tendo em consideração a variação da superfície livre e a área da secção transversal da embocadura, quando aplicados ao estuário do Mondego, revelaram resultados muito dispares com os obtidos na estação da Embocadura.

Relações entre o Prisma de Maré e os Volumes Geométricos

Relacionaram-se os prismas de maré determinados nos diversos ciclos de maré (**P**) no estuário, com os correspondentes prismas de maré geométricos ($\mathbf{P}_g$), de acordo com o gráfico da figura 5.3.4. 8. Da análise deste, tornou-se possível determinar que a variação das magnitudes dos prismas **P** e $\mathbf{P}_g$ praticamente coincidiram nas estações da Gala e Cinco irmãos (definindo relações de magnitudes praticamente de 1:1), enquanto na estação da Embocadura os prisma geométricos

foram em média cerca de 4 vezes mais elevados. Esta diferença de magnitudes relacionou-se com uma sobre-estimação de $\mathbf{P}_{g,Emb}$ associada ao método de cálculo adoptado. Este, fundamentou-se em estimativas das distância longitudinais alcançadas pela maré salina no canal principal, tendo por base apenas a informação maregráfica obtida em cada ciclo de maré aferida em cada estação. Estas distâncias foram estimadas tendo em consideração as posições relativas quer da maré salina aquando da BM, quer das velocidades quer dos tempos de enchente.

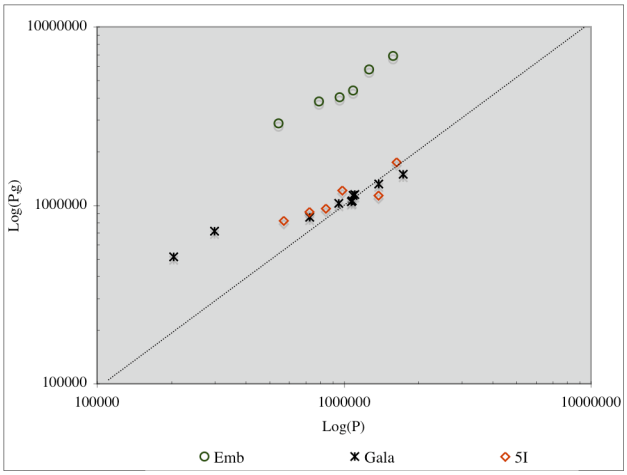


Figura 5.3.4. 8. Tendências de variação definidas apartir da confrontação dos prismas de maré determinados no estuário pelo método secção-velocidade (**P**) com os prismas geométricos obtidos apartir do levantamento batimétrico vectorizado do estuário tendo em consideração as variações longitudinais da ZM. Foram definidas as seguintes equações de regressão: $P_{g,Emb}=4.411*P_{Emb}$, com $r^2=0.94$, $r=0.97$, $p<0.05$, $N=6$; $P_{g,5I}=1.0653*P_{5I}$, com $r^2=0.62$, $r=0.79$, $N=6$; $P_{g,Gala}=0.9907*P_{Gala}$, com $r^2=0.50$, $r=0.70$, $p<0.05$, $N=10$. Na legenda Emb, 5I e Gala representaram respectivamente os prismas de maré referentes à estação da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos.

A localização da estação da Embocadura num sector dominado pelo domínio ZC não permitiu determinar correctamente as posições relativas da maré salina aquando da BM. Estimada a distância longitudinal percorrida pela maré salina, determinaram-se os volumes de P_g de acordo com os pressupostos geométricos do prisma de maré considerado em Dyer & Taylor (1973). Estes volumes geométricos não reflectiram a variação longitudinal que a superfície livre possa ter sofrido no canal principal. Porém, os prismas de maré determinados na Embocadura ($\mathbf{P}_{Emb}$), muito embora muito mais pequenos que os determinados geometricamente, descreveram uma tendência de variação directa proporcional significativa com $\mathbf{P}_{g,Emb}$, validando mesmo assim aqueles resultados. Esta validação fundamentou-se na grande sobreposição dos resultados constatados entre os prismas de maré determinados por diferentes métodos, e que se encontram representados na figura 5.3.4. 8.

Os prismas **P** foram calculados nas diferentes estações do estuário (Embocadura, Gala e Cinco Irmãos) tendo por base o método secção-velocidade, enquanto os correspondentes $\mathbf{P}_g$ foram determinados no item 5.3.2.2.

5.3.4.5. Relações entre os Prismas de Maré e as Descargas Fluviais

Tendo por base o diagrama proposto por Borrego *et al* (1995), que define as variações ocorridas entre a razão dos volumes da maré e dos caudais fluviais para marés mortas, médias e vivas para os estuários do Guadiana e Odiel, no âmbito deste trabalho sugere-se uma alteração do mesmo, exemplificando-se com o estuário do Mondego, de acordo com os gráficos das figuras 5.3.4. 9 e 5.3.4. 10. Introduziu-se-lhe o quociente entre o prisma de maré e o volume fluvial (**P**/R), relacionando-o com as descargas fluviais (Q_r), e ainda se quantifica o grau de mistura e simultaneamente o grau da estratificação com recurso ao parâmetro de estratificação (n_s) definido por Hansen & Rattray (1966 *in* UNESCO, 1992). O primeiro parâmetro, correspondente ao inverso da razão de fluxo, relaciona a importância relativa dos principais agentes hidrodinâmicos intervenientes nos processos de mistura sob a forma de uma relação entre os volumes entrados com a maré e os volumes fluviais descarregados no sistema. Segundo Simmons, 1955 *in* Dyer (1997), este parâmetro representa a competição ocorrida entre os regimes fluviais e maré, definindo para **P**/R<1 um regime do tipo cunha salina, e para **P**/R>10 um do tipo bem misturado. Os limites adoptados de n_s para quantificar os diferentes graus de mistura e de estratificação foram definidos com base nos trabalhos de Unesco (1992) e de Dyer (1997), considerando-se do tipo I para os valores de $n_s>1$, do tipo II para os valores compreendidos entre os $0.15<n_s<1$, e do tipo III para $n_s<0.15$. Foram também traçados nestes diagramas as linhas que definiram os níveis críticos da maré considerados mais relevantes, nomeadamente a de A_w=0.9m representativa das marés de menor amplitude, a de A_w=1.6m expressiva das marés médias e diferenciadora das marés vivas das mortas, bem como, a linha de A_w=2.6m representativa das marés de maior amplitude (determinados no item 5.1.1). Para cada um dois canais mais importantes do estuário, foram elaborados dois

diagramas de circulação-estratificação, com a indicação dos caudais fluviais de época estival, médio anual e de cheia drenados em cada um, quer pelas descargas do Mondego quer do Pranto, uma vez que as primeiras condicionaram apenas a dinâmica do canal principal enquanto as segundas somente a do braço sul. Os caudais fluviais médios adoptados foram os determinados por Direcção Geral de Portos (1990) e Baptista *et al* (1995). Cada um destes diagramas foi elaborado com base nos resultados obtidos nas três estações localizadas no domínio marinho e na zona de mistura do estuário, tendo as estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos caracterizado o canal principal, de acordo com a figura 5.3.4. 9 e as séries de dados obtidas na estação da Gala, caracterizado o diagrama de circulação-estratificação para o braço sul, representado na figura 5.3.4. 10. Uma vez que os valores dos parâmetros projectados nos dois gráficos, foram obtidos em vários sectores do estuário e foram representativos da actuação conjugada dos caudais fluviais, das correntes de maré, do gradiente de pressão, dos fenómenos de advecção e difusão turbulenta locais, à semelhança de Officer (1983 *in* Miranda *et al* , 2002), considerou-se que aqueles definiram os padrões de distribuição da salinidade que são específicos para cada braço do estuário, tendo também sido representativos da dinâmica, da estratificação da densidade, e dos processos de mistura resultantes da complexa interacção entre a hidrodinâmica e a fisiografia dos dois canais mais importantes do estuário.

Relacionados os prismas de maré e os volumes fluviais das várias séries de dados medidos nas estações da Embocadura e dos cinco Irmãos, quer com os respectivos caudais do Mondego, quer com a altura da maré, quer com os parâmetros de estratificação associados, elaborou-se o diagrama representado na figura 5.3.4. 9. Dos 12 ciclos de maré projectados, foi possível identificar vários exemplos de quadros de mistura e estratificação dos tipos I, II e III *sensus* Pritchard (1989) *in* Miranda *et al* (2002) e Unesco (1992). Os valores de interface definidos para estes três domínios foram marcados com base nos parâmetros de estratificação determinados para cada série de dados (no item 5.3.1.2), e tendo em consideração as respectivas posições relativas no diagrama de

circulação-estratificação. Desta forma, a linha de transição entre os domínios bem misturado e o parcialmente misturado, definida por Dyer (1997) para n_s=0.15, foi posicionada neste diagrama para uma relação de **P**/R≈1, que foi praticamente coincidente com a posição relativa do ciclo de maré E80392, a qual foi caracterizada por $n_{s,E80392}$≈0.16. Já a linha de transição entre os domínios parcialmente misturado e o de cunha salina, para a estação da Embocadura foi assinalada neste diagrama para uma relação de $(\mathbf{P}/R)_{Emb}$≈0.25, enquanto para a estação dos Cinco Irmãos foi marcada para um *ratio* $(\mathbf{P}/R)_{5I}$≈0.35, de acordo com a figura 5.3.4. 9. A projecção da primeira linha de interface fundamentou-se na análise dos ciclos de maré E70293 e E190593 que ao terem apresentado respectivamente $n_{s,E70293}$≈0.5 e $n_{s,E190593}$≈1.10, apresentaram posições relativas no diagrama de circulação-estratificação que ladearam a linha de interface definida por n_s≈1 em Unesco (1992). Interpoladas as respectivas distâncias relativas desta linha divisória (em relação a $n_{s,E70293}$ e a $n_{s,E190593}$), assinalou-se a linha divisória sensivelmente a meia distância dos dois, interceptando o eixo das ordenadas deste diagrama para uma relação aproximada a $(\mathbf{P}/R)_{Emb}$≈0.25. Na estação dos Cinco Irmãos, distante ≈7.5km da foz, a linha divisória $(\mathbf{P}/R)_{5I}$≈0.35 foi assinalada tendo por base os valores de $n_{s,5I80893}$≈0.75 e de $n_{s,5I141193}$≈1.04 referentes aos ciclos de maré 5I80893 e o 5I141193, os quais pertenceram respectivamente aos domínios do tipo II e I. Esta diferença registada no quociente entre volumes P/R ao longo do canal principal do estuário, que foi favorável aos volumes fluviais, reflectiu a maior distância à foz do estuário por parte da estação dos Cinco Irmãos, enquadrando-se a embocadura no domínio marinho e a dos 5I na zona de mistura do canal principal.

No diagrama circulação-estratificação da figura 5.3.4. 9, o domínio tipo III foi caracterizado por relações de **P**/R>1, e foi apenas representado pela série de dados 5I80893, no canal principal. Este ciclo de maré descreveu uma estratificação de densidade muito pequena com uma estrutura bem misturada (com n_s<0.15), e definiu um regime hidrodinâmico dominado pela maré, cujas condições de turbulência se sobrepuseram à estratificação da densidade ($R_{i,E}$<0.08) à semelhança do

descrito em Darbyshire & West (1992). Para as marés de menor amplitude, da ordem dos $A_{w,CP}\approx 0.9m$, este quadro de mistura teve lugar aquando de descargas do Mondego inferiores a $Q_{r,Emb}\leq 12m^3/s$, enquanto aquando de marés de maior amplitude ($A_{w,CP}\approx 2.6m$) teve lugar sob descargas do Mondego pelo menos inferiores a $Q_{r,Emb}\leq 40m^3/s$. O quadro de mistura do tipo I, enquadrou-se neste diagrama para valores da ordem dos $(\mathbf{P}/R)_{Emb}<0.25$ tendo como referência a estação da Embocadura, e da ordem dos $(\mathbf{P}/R)_{5I}<0.35$ para a dos Cinco Irmãos. A primeira foi representada pelas séries de dados E190593 e E111193, enquanto a segunda estação pelas séries 5I141193 e 5I51293. Descreveram quadros muito estratificados de densidade (com $n_s>1$) e uma mistura muito pequena ($R_{i,E}>0.8$) definida por uma cunha salina de fundo de origem marinha, e com uma hidrodinâmica dominada pelas descargas fluviais à semelhança do descrito por Chant & Wilson (2000). Para marés de altura da ordem dos $A_{w,CP}\approx 0.9m$, este quadro de mistura e estratificação teve lugar aproximadamente sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}>45m^3/s$, e dos $Q_{r,Emb}>160m^3/s$ sob marés de $A_{w,CP}\approx 2.6m$. O domínio do tipo II, enquadrou-se no diagrama para valores de $0.25<(\mathbf{P}/R)_{Emb}<1$ e definiu um quadro de mistura e estratificação intermédio ao descrito nos dois domínios anteriores. Foi representado pelos ciclos de maré E80392, E150392, E100893 e E70293 na estação da Embocadura e por 5I40293, 5I70392 e 5I80893 nos Cinco Irmãos.

Da análise do diagrama da figura 5.3.4. 9, também foi possível constatar que durante a época estival o quadro de mistura e de circulação que dominou o canal principal foi do tipo bem misturado. Contudo, aquando das descargas médias anuais do Mondego[3] o quadro de mistura passou a ser dominado pelo regime parcialmente misturado, enquanto durante o Inverno, aquando dos período de maiores descargas do Mondego o canal principal passou a apresentar uma estrutura da salinidade do tipo cunha salina, definida por um quadro de mistura do tipo I. Quadro este também extensível às cheias de maior amplitude de caudal, designadamente de quarto de século ou até mesmo centenárias.

[3]. Representativas de um maior número de dias por ano.

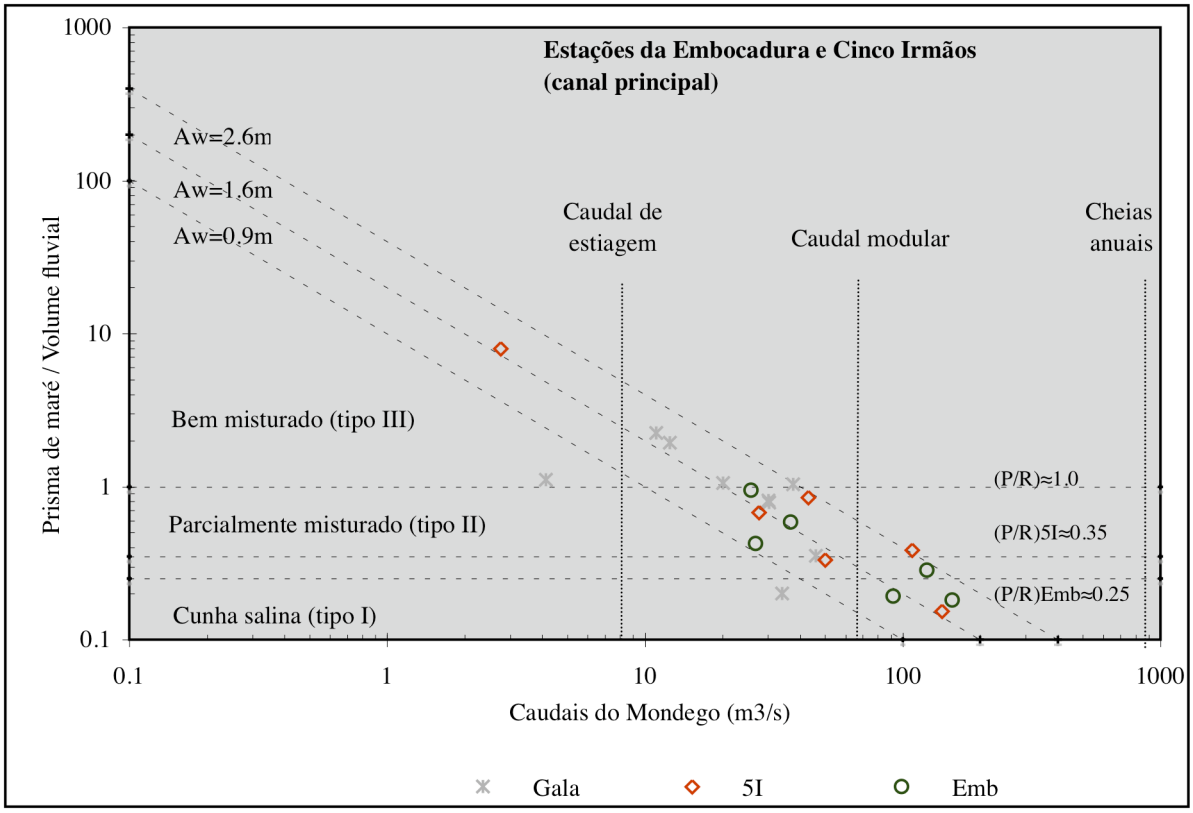


Figura 5.3.4. 9. Diagrama de circulação-estratificação definido para o canal principal do estuário tendo por base parâmetros hidrográficos referentes aos vários ciclos de maré medidos nas estações da Embocadura e nos Cinco Irmãos. Em ordenadas encontram-se projectadas as relações obtidas entre o prisma de maré e o volume fluvial (**P**/R) obtidas para os vários ciclos de maré, enquanto em abcissas as respectivas descargas do Mondego (Q_r), expressas em m^3/s. As escalas de ambos os eixos encontram-se em três linhas de igual altura da maré, nomeadamente para marés de baixa amplitude (A_w≈0.9m), marés médias (A_w≈1.6m) e marés de amplitude muito elevada (A_w≈2.6m). As marés vivas posicionaram-se para A_w>1.6m, enquanto as mortas para A_w<1.6m. Projectaram-se igualmente os caudais médios do Mondego de época estival (de Q_r≈10m^3/s), os caudais médios anuais (de Q_r≈70m^3/s) e os caudais de cheia anual (de Q_r≈900m^3/s). A estes, corresponderam respectivamente regimes bem misturados, parcialmente misturados e de cunha salina. No diagrama, os domínios de mistura e estratificação do tipo I, II, e III foram definidos respectivamente para razões de $(\mathbf{P}/R)_{Emb}$<0.25, de 0.25<$(\mathbf{P}/R)_{Emb}$<1, e de $(\mathbf{P}/R)_{Emb}$>1. Na estação dos Cincos Irmãos a transição do domínio I para o II correspondeu a $(\mathbf{P}/R)_{5I}$≈0.35. Para marés médias de $A_{w,Emb}$≈1.6m, o quadro de mistura do tipo I teve lugar sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}$>80m^3/s, o tipo II ocorreu sob descargas compreendidas entre os 20<$Q_{r,Emb}$<80m^3/s, e para o tipo III sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}$<20m^3/s. Na legenda desta figura, "Emb" representou os ciclos de maré correspondentes à estação da Embocadura, "5I" os da estação dos Cinco Irmãos e "Gala" os da estação da Gala.

O estudo deste diagrama também permitiu apurar, que para a amplitude de variação da altura da maré em análise (que foi da ordem dos ΔA_w≈2.6-0.9≈1.7m), a transição entre os quadros do tipo III para o II, definida por **P**/R≈1, foi caracterizada por uma amplitude de variação das descargas do Mondego de apenas ΔQr≈40-12≈28m^3/s, enquanto para a transição entre os tipos II e o I, determinada para **P**/R≈0.25 definiu uma amplitude de variação das descargas do Mondego da ordem dos ΔQr≈160-45≈115m^3/s.

Elaborado o diagrama de circulação-estratificação para a estação da Gala, representado na figura 5.3.4. 10, verificou-se que nenhum dos ciclos de maré estudados foi definido por um regime do tipo I, tendo apenas sido identificados do tipo II e III. Contudo, estes apresentaram uma distribuição aparentemente aleatória, não tendo sido possível definir qualquer padrão de distribuição, muito menos uma transição entre estes dois regimes. Tal comportamento, ter-se-á fundamentalmente relacionado com os complexos fenómenos de mistura ali ocorridos, uma vez que aquando da BM todo o sector distal do braço sul e parte do sector médio encontraram-se submersos por uma massa de água de mistura. Aquando da fase da enchente, esta massa de água foi novamente empurrada para montante longitudinalmente com a entrada da maré, registando-se tendências de quadros bem misturados na estação da Gala durante as marés mortas (G50392 e G110893) e quadros parcialmente misturados nas marés vivas analisadas (G60393, G200593, G121193 e G91293). Nestes quadros parcialmente misturados, dois apresentaram quer a fase da enchente, quer a de vazante com estruturas parcialmente misturadas, enquanto os restantes dois ostentam uma estrutura bem misturada durante a vazante e uma estrutura parcialmente misturada durante a enchente. Os baixos quadros de estratificação vertical e longitudinal de salinidade registados neste braço, associados a quadros de mistura moderados a altos, relacionaram-se com o domínio hidrodinâmico por parte da maré, bem como com os baixos caudais do Pranto, com características marcadamente sazonais. Acresceu também o facto de a abertura das comportas da Quinta do Canal se ter feito exclusivamente apenas durante as fases da vazante e princípios da enchente.

Comparativamente ao canal principal, o braço sul, para além de ter sido apenas definido por misturas elevadas a moderadas na coluna de água, os quadros parcialmente misturados coincidiram sempre com as estruturas do tipo cunha salina registadas no canal principal, muito embora tenham sido amostradas relações de volume **P**/R semelhantes às nas estações do canal principal (de **P**/R≈0.25 ou de **P**/R≈0.35). Porém, estas reflectiram relações entre prismas de maré mais pequenos e volumes fluviais muito inferiores aos que circularam pelo canal principal. Estes resultados vão

contra aos pressupostos definidos em Dyer (1997), pelo que também se confirma a não aplicação deste modelo de definição da mistura e estratificação recorrendo à razão de fluxo para o braço sul, tanto que a fisiografia de um canal profundo na parte central ladeado por margens com ambientes intermareais não se verifica neste braço.

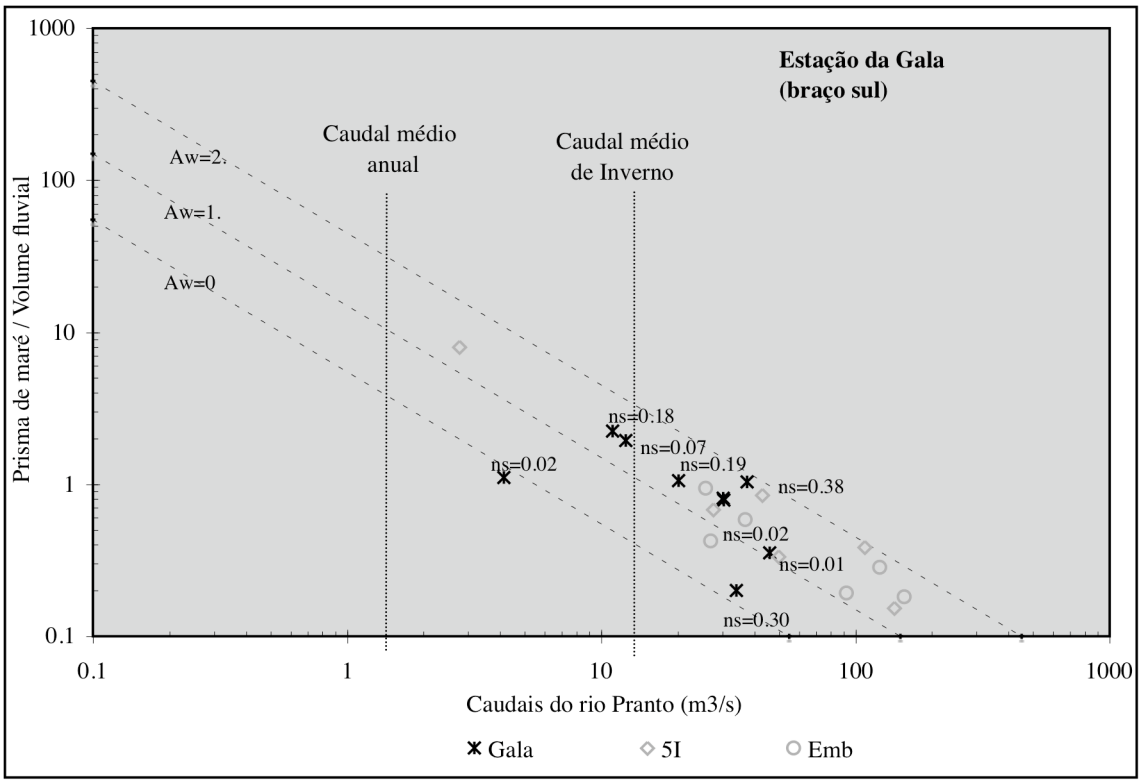


Figura 5.3.4. 10. Diagrama de circulação-estratificação definido para o braço sul do estuário tendo por base parâmetros hidrográficos referentes às 10 séries de dados medidas na estação da Gala. Em ordenadas encontram-se projectadas as relações obtidas entre o prisma de maré e o volume fluvial (**P**/R) obtidas para os vários ciclos de maré, enquanto em abcissas as respectivas descargas do rio Pranto (Q_r), expressas em m^3/s. As escalas de ambos os eixos encontram-se três linhas de igual altura da maré, nomeadamente para marés de baixa amplitude ($A_w \approx 0.9m$), marés médias ($A_w \approx 1.6m$) e marés de amplitude muito elevada ($A_w \approx 2.6m$). As marés vivas posicionaram-se para $A_w > 1.6m$, enquanto as mortas para $A_w < 1.6m$. No diagrama, os domínios de mistura e estratificação do tipo II e III distribuíram-se de uma forma aleatória no diagrama. Os caudais do Pranto durante a época estival foram praticamente nulos, pelo que foram apenas projectados os caudais médios anuais ($Q_r \approx 1.5 m^3/s$) e os caudais médios de Inverno que poderão ter rondado os $Q_r \approx 14 m^3/s$. Na legenda desta figura, "Gala" representou os ciclos de maré medidos na estação da Gala, enquanto "Emb" e "5I" nas estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos.

Comparados os valores de transição definidos para o canal principal do estuário do Mondego, com os definidos em Dyer (1997), constatou-se que no primeiro as magnitudes de **P**/R foram cerca de 10 vezes mais pequenas para definir a transição do tipo III para o II, e cerca de 4 vezes inferiores para definir a transição do tipo II para o I. No modelo descrito pelo referido autor, seriam necessários volumes fluviais pelo menos iguais ou superiores ao prisma de maré para que aqueles passassem a

dominar a hidrodinâmica e a mistura no estuário, definindo um regime do tipo I (cunha salina), enquanto os regimes bem misturados teriam lugar quando os volumes fluviais fossem inferiores a pelo menos 10 vezes o prisma de maré. Contudo, no estuário do Mondego estes quadros de mistura tiveram lugar respectivamente quando os volumes do Mondego igualaram ou suplantaram os da maré, e quando foram pelo menos superiores ao quádruplo do Prisma de maré. A título de exemplo, para marés médias de $A_{w,Emb}\approx1.6m$, estes quadros de mistura tiveram lugar sensivelmente sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}\approx80m^3/s$ e dos $Q_{r,Emb}\approx20m^3/s$, respectivamente (quando pelo modelo de Simmons, 1955 *in* Dyer (1997) aqueles deveriam ocorrer sob descargas do Mondego da ordem dos $20m^3/s$ e dos $2m^3/s$) (ver figura 5.3.4. 9). Estes resultados levam a considerar que tenha havido um claro domínio por parte da maré nos processos de circulação e mistura estuarina, desequilibrando por completo a relação **P**/R favoravelmente aos volumes do prisma de maré.

A fisiografia completamente regularizada do canal principal, definida por um traçado longitudinal muito rectilíneo e por uma batimetria regularizada, desprovida de obstáculos naturais (aspectos analisados e justificados nos itens 2.2 e 5.2, terá propiciado a entrada e a propagação da maré no interior deste sistema e consequentemente o domínio desta nos processos de mistura e circulação estuarina.

À semelhança do que concluiu Bowden (1978) e Mied *et al* (2000) para estuários similares ao do Mondego, a maré terá sido responsável pelo aumento da turbulência na coluna de água e ter incrementado a mistura vertical. Este diagrama de estratificação-circulação para o canal principal também poderá contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos e aproveitamento hidráulico do Baixo Mondego, ao permitir a definição dos vários quadros de mistura, estratificação e circulação envolvidos no estuário, bem como, fazer previsões de condições hidrodinâmicas consideradas extremas, tais como, aquando de cheias e de marés máximas. Desta forma, também assegurar não apenas caudais ecológicos segundo uma vertente ambiental (Alves & Bernardo,

2002; INAG, 2002), mas também passar a assegurar caudais mínimos no Açude de ponte de Coimbra que salvaguardem no sector estuarino caudais do Mondego que garantam um determinado quadro de mistura e de transporte sedimentar, que se propõe ser designados de caudais de circulação.

Este modelo, deverá também contribuir para a definição dos adequados regimes de caudal ecológicos[4] afim de manter as características geomorfológicas e hidráulicas do caudal fluvial e, consequentemente, a heterogeneidade dos habitats aquáticos e ribeirinhos e as características bióticas daí decorrentes (Alves & Bernardo, 2002; INAG, 2002). Segundo estes, os aproveitamentos hidráulicos e a artificialização do regime natural das bacias hidrográficas alteram o regime hidrológico dos cursos de água a jusante, devido ao efeito de regularização de caudais, captação e derivação de água e às perdas por evaporação. As alterações do regime hidrológico a jusante verificam-se ao nível da redução do caudal médio anual, da diminuição da variação sazonal do caudal, da alteração da época de ocorrência dos caudais extremos, reduzindo a magnitude das cheias e/ou impondo descargas não naturais. A recomendação de um regime de caudal ecológico deve ser acompanhado pela definição de caudais de limpeza ("flushing flows") para remoção de materiais finos depositados e prevenção da invasão do leito pela vegetação, e da sua capacidade de transporte, caudais para manutenção da zona riparia, leito de cheia, características do vale e manutenção do nível freático, assim como caudais de manutenção dos ecossistemas associados aos cursos de água como, por exemplo, zonas húmidas. A necessidade de garantir determinados regimes de caudais face a objectivos de recuperação ou manutenção de estados de boa ou elevada qualidade ecológica é implicitamente reconhecida pela Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro, que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da politica da água. Com efeito, esta directiva considera, no respectivo Anexo V, o regime

[4]. Por vezes, também designados de regime de caudais ambientais.

hidrológico, incluindo nos elementos hidromorfológicos de suporte dos elementos biológicos, cada um dos elementos de qualidade para a classificação dos estado ecológico dos cursos de água.

5.3.4.6. Tempos de Residência e Descargas Fluviais

O Tempo de residência (T_r) constitui um indicador importante do comportamento ecológico e da capacidade de auto-limpeza de sistemas estuarinos, bem como, uma componente importante para a classificação destes sistemas (Oliveira 1996; Oliveira *et al*, 1996; Oliveira & Baptista, 1997). Desta forma, pretendendo-se estudar os tempos de residência em vários sectores do estuário do Mondego e quantificar a capacidade de remoção de substâncias pelos principais mecanismos de transporte, dada a elevada carga poluente lançada para o rio e para o estuário do Mondego (Caetano, 1989; Baptista *et al*, 1995). Para tal, adoptou-se a definição de Tempo de residência proposta por Sanford *et al* (1992) como correspondendo ao tempo que uma massa de água doce (ou de um traçador conservativo) permaneceu no estuário, antes de ser lançada para o oceano. Para calcular o Tempo de residência (T_r) também se recorreu ao modelo proposto pelo referido autor, em Chi-Fang *et al* (2004), uma vez que este comparou a energia da onda de maré (por intermédio da amplitude da constituinte M_2 da velocidade) e do prisma de maré, com as descargas fluviais em cada ciclo de maré. Também recorreu ao coeficiente de retorno (b), definido por (Sanford *et al*, 1992) e que Moore *et al* (2006) determinou recorrendo à relação entre a amplitude da componente horizontal (u_{M2}) e as velocidades médias da fases da vazante ($\overline{u}_v$) e da enchente ($\overline{u}_e$), tal que, $b=(u_{M2}-\overline{u}_v)/(u_{M2}+\overline{u}_e)$. Estes parâmetros, reflectiram as condições locais do estuário e os principais mecanismos físicos de transporte, designadamente a maré, as descargas fluviais, e a circulação induzida quer pela densidade, quer por elementos meteorológicos, quer induzida por variações topográficas do estuário do Mondego (Chi-Fang *et al*, 2004; Moore *et al*, 2006).

Para os vários ciclos de maré estudados nas estações da Embocadura, Gala, e Cinco Irmãos determinaram-se os tempos de residência para os diferentes quadros hidrodinâmicos amostrados por aquele método, que foram representativos de um leque de variações de altura de maré de

$0.9 \leq A_w \leq 2.6$m e descargas fluviais inferiores a $Q_{r,Mond} \leq 155 m^3/s$ para o Mondego e inferiores a $Q_{r,Mond} \leq 46 m^3/s$ para o caso do rio Pranto.

Verificou-se para a estação da Embocadura, a ocorrência de tempos de residência compreendidos entre os $2.9 \leq T_{r,Emb} \leq 2.9$ ciclos de maré, para a estação dos Cinco Irmãos tempos compreendidos entre os $2.1 \leq T_{r,5I} \leq 8.7$ ciclos de maré, e para a estação da Gala tempos compreendidos entre os $2.2 \leq T_{r,Gala} \leq 4$ ciclos de maré (ou quando expressos em dias, respectivamente de: $1.1 \leq T_{r,Emb} \leq 1.5$ dias, de $1.1 \leq T_{r,5I} \leq 4.5$ dias, e $1.1 \leq T_{r,Gala} \leq 2.1$ dias). Os coeficientes de retorno de fluxo obtidos nestas estações apresentaram magnitudes compreendidas entre os $0.48 \leq b_{Emb} \leq 0.84$, $0.38 \leq b_{Gala} \leq 0.86$, e $0.28 \leq b_{5I} \leq 0.88$, tendo as menores magnitudes de b estado associadas aos maiores caudais fluviais, e as maiores às descargas fluviais mais pequenas (quadro 5.3.4. 2), o que foi de encontro ao definido em Luketina (1998); Sanford *et al* (1992); Chi-Fang *et al* (2004) e Moore *et al* (2006) ao relacionar uma maior capacidade em remover do sistema estuarino substâncias conservativas aquando das maiores descargas fluviais.

Na estação da Gala, o ciclo de maré G60293 decorreu sob $Q_r \approx 1 m^3/s$ e $A_w \approx 2.3$m e foi definido por um coeficiente de b=1.36 e por um tempo de residência de $T_r \approx -16$ ciclos de maré, que não faz qualquer sentido físico. Este facto, ter-se-á relacionado com uma subestimação do volume da massa de água drenado pelo rio Pranto para a estação da Gala, nesse ciclo de maré, que foi da ordem dos $V_{r,G60293} \approx 967 m^3$. Desta forma quando relacionado com o prisma de maré, a razão de fluxo deste ciclo de maré deu um valor muito próximo de zero e consequentemente inviabilizou a determinação do tempo de residência.

Quanto aos restantes resultados, aferidos nas várias estações em análise, constatou-se que os maiores valores de T_r estiveram associados às menores descargas fluviais, assim como, a marés de menor amplitude.

De entre as estações em estudo, os menores T_r localizaram-se na Embocadura e desta forma reflectiram um tempo de permanência neste sector distal do estuário consentâneo com a grande

proximidade desta estação à foz do estuário. Verificou-se igualmente que os T_r foram sempre superiores ao período de um ciclo de maré, tendo os tempos de residência igualado as T_w=12.42h, quando V_{BM}=0, ou seja, apenas nos sectores intermareais dos troços médio-proximal do braço sul.

Os resultados obtidos na estação da Gala quando comparados com os tempos de residência estimados por Duarte *et al* (2002) para o braço sul, apartir do modelo numérico de diferenças finitas, revelaram ter sido praticamente coincidentes, dado ter definido tempos compreendidos entre os 0.7<T_r<1.4dias (ou 1.3<T_r<2.7ciclos de maré), considerando caudais fluviais de $Q_{r,Pranto}$=5m^3/s e $Q_{r,Pranto}$=10m^3/s e a simulação de lançamento de 1.8kg de traçador.

Relativamente ao canal principal, o autor deste trabalho não tem conhecimento da existência de qualquer estimativa de Tempos de residência, por outros autores ou recorrendo a outros métodos, mas considera que as magnitudes determinadas de $T_{r,Emb}$ e a tendência de variação de $T_{r,Emb}$ definida quer com $A_{w,Emb}$, quer com $Q_{r,Emb}$ apontam para valores consentâneos com a hidrodinâmica deste sector distal estuarino. Contudo, relativamente a outros sistemas estuarinos semelhantes, estes resultados adquirem magnitudes muito similares às descritas por exemplo por Miranda & Castro, 1993 *in* Miranda *et al* (2002) no estuário de Bertioga (SP), ao determinarem T_r=2.5 dias para marés vivas e T_r=3.2 dias para marés mortas, enquanto Geyer, 1997 *in* Miranda *et al* (2002) estimou t_r=1.5 dias para sem vento, e t_r=2.5 dias para ventos convergentes à costa de intensidade 6m/s, para os estuários dos rios Child e Quashnet (USA).

Coincidindo as estações da Embocadura e da Gala com os principais pontos de lançamento de efluentes urbanos municipais, os tempos de residência determinados, para além de sugerirem uma permanência elevada destes poluentes no interior do estuário, este período terá sido inferior na embocadura. Os tempos de residência mais elevados registados no braço sul, quando associados às descargas do Pranto[5] excessivamente carregadas em nutrientes e produtos químicos diversos, acrescida das fortes descargas orgânicas e de nutrientes provenientes do Esteiro dos Armazéns, que

[5]. provenientes das comportas da Quinta do Canal.

são em muito responsáveis pela eutrofização ocasional do braço sul (Batista *et al*, 1995), sugerem que este subsistema se comporte como um grande reservatório destes poluentes. Para além de uma forma diferente de gestão da abertura das comportas da Quinta do Canal sugerida por Baptista *el al* (1995), sugere-se também a reabertura da confluência proximal do braço sul com o norte, afim de permitir uma maior circulação da massa de água de mistura do sector proximal do braço sul para o braço norte. Sendo esta massa de água de mistura a que apresenta maior tempo de residência (bem como as maiores temperaturas na época estival, as menores salinidades e teores em oxigénio muito reduzidos) e contribuindo de uma forma significativa para a eutrofização do braço sul.

Quadro 5.3.4. 2. Quadro com as magnitudes das alturas da maré (Aw), com as descargas fluviais (Qr), com os prismas de maré (P), com os volumes fluviais (R), as amplitudes da velocidade da constituinte M2 (UM2), as velocidades médias das fases das enchentes (Ue) e vazantes (Uv)), os factores de fluxo retorno (b) e com os Tempos de residência de terminados para as estações da Embocadura (Emb), Gala (G) e Cinco Irmãos (5I).

Estações	Ciclos de maré	Aw	Qr	P	R	UM2	Ue	Uv	b	Tr
		(m)	(m3/s)	(m3)	(m3)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(-)	(ciclos maré)
Embocadura	E100893	0.90	27	542566	1279539	0.32	-0.19	0.22	0.78	2.4
	E150392	1.35	37	959809	1641936	0.45	-0.26	0.30	0.77	2.5
	E80392	1.46	26	1087338	1151742	0.45	-0.27	0.30	0.84	2.9
	E190593	1.37	92	790806	4111558	0.43	-0.27	0.30	0.78	2.2
	E70293	2.57	124	1579534	5554835	0.49	-0.25	0.38	0.48	2.2
	E111193	2.31	155	1262438	6944811	0.48	-0.26	0.37	0.51	2.2
Gala	G61291	1.80	12	1077580	557360	0.40	-0.23	0.28	0.68	3.6
	G201291	1.78	30	1070933	1355315	0.48	-0.25	0.35	0.57	2.6
	G50392	1.45	46	726428	2058275	0.43	-0.20	0.34	0.41	2.3
	G160392	1.93	30	1088400	1347976	0.43	-0.23	0.31	0.58	2.7
	G60293	2.25	1	1381452	967	0.35	-0.25	0.21	1.39	-
	G200593	1.95	11	1107420	496078	0.39	-0.23	0.26	0.83	4.0
	G110893	0.87	4	204520	184770	0.17	-0.10	0.11	0.86	3.0
	G121193	2.56	38	1737677	1677219	0.50	-0.29	0.35	0.72	2.9
	G91293	1.74	20	950336	901600	0.39	-0.22	0.26	0.76	2.9
	G60295	1.20	34	298709	1498357	0.25	-0.12	0.20	0.38	2.2
Cinco Irmãos	5I140392	1.21	3	982970	123434	0.36	-0.22	0.24	0.88	8.7
	5I40293	1.20	28	841957	1233442	0.39	-0.24	0.27	0.78	2.6
	5I70392	1.79	43	1629454	1922487	0.50	-0.29	0.36	0.67	2.7
	5I80893	1.19	50	568182	1701909	0.29	-0.19	0.20	0.94	2.3
	5I141193	2.10	109	1378711	3576270	0.39	-0.27	0.30	0.73	2.3
	5I51293	1.96	142	724044	4728311	0.35	-0.15	0.29	0.28	2.1

Neste item propõe-se um novo diagrama de circulação-estratificação que relaciona em ordenadas o quociente entre os tempos de residência com os caudais fluviais (Q_r) para os vários ciclos de maré, e em abcissas as descargas fluviais (Q_r). Apresenta o pressuposto de considerar a distribuição da salinidade nestas três estações sob quadros de mistura bem misturado e parcialmente misturado. Permite quantificar a capacidade de remoção de substâncias em vários sectores do estuário e determina as respectivas escalas de tempo de transporte. Permite também caracterizar os diferentes processos intervenientes na remoção de poluentes conservativos.

Da análise deste diagrama, também se constata que, para as estações Embocadura e Gala, aquando de descargas fluviais da mesma ordem de grandeza, os T_r da Gala são superiores, bem como, o mesmo se passa entre as estações da Embocadura e os Cinco Irmãos, com $T_{r,5I} >> T_{r,Emb}$. Nestas estações os Tempos de residência das marés vivas, foram inferiores aos registados nas marés mortas, sob condições constantes de Q_r, bem como, os resultados obtidos, vieram confirmar a dependência de T_r relativamente a Q_r e A_w ocorrida no estuário.

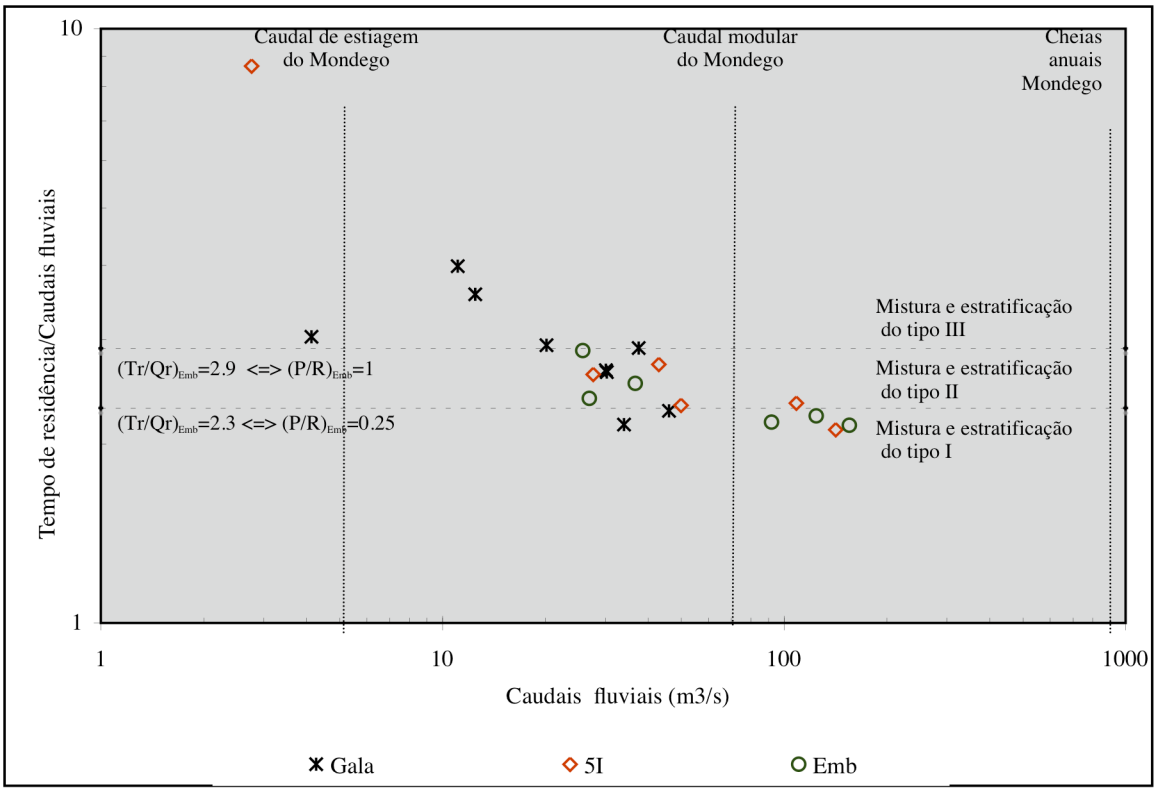


Figura 5.3.4. 11. Diagrama circulação-estratificação do estuário do Mondego tendo por base o Tempo de residência (T_r) determinado para os vários ciclos de maré aferidos nas estações da Embocadura (Emb), Cinco Irmãos (5I) e Gala (Gala). O Tempo de residência é expresso em ciclos de maré. Em ordenadas relaciona-se o T_r com as descargas fluviais (Q_r) expressas em m^3/s, sob a forma do quociente T_r/Q_r e em abcissas as respectivas magnitudes de Q_r. Este diagrama para além de descrever Tempos de residência mais pequenos sob descargas fluviais mais elevadas, realça T_r comparativamente mais elevados nas estações dos 5I na Gala.

Poder-se-iam ter aplicado aos dados do estuário outros modelos de prisma de maré modificados, tais como o de Luketina (1998), ou ainda modelos fundamentados nos balanços de água e sal, tal como o de Pritchard, 1960 *in* Wang *et al* (2004), mas estes estudos comparativos ficam no âmbito dos trabalhos futuros.

5.3.5. Distorção da Maré

A onda de maré ao propagar-se num estuário pouco profundo sofre dissipação de energia, fundamentalmente em resultado da interacção dos escoamentos com a fisiografia dos canais. A distorção sofrida pela onda pode ser condicionada pela amplitude de maré, pelo atrito gerado com o fundo, pelo transporte sedimentar, pela geometria do estuarino, bem como, pela acção de correntes estuarinas de origem fluvial e oceânica não controladas pela maré (Speer *et al,* 1991; van Rijn, 1994). Desta forma, a circulação da maré pode ser definida em função das características físicas e geométricas do estuário, em que a onda gravítica original sofre variações das amplitudes das suas constituintes e atrasos nas suas fases, bem como, ocorrem transferências de energia não lineares que produzem componentes de maré secundarias, com amplitudes e fases distintas (Blanton & Andrade, 2001). A dissipação de energia associada à formação destes harmónicos pode produzir assimetrias quer na variação vertical do nível da água, quer nas velocidades das correntes da maré (Blanton *et al*, 2002). Para além do atrito de fundo, autores como Aubrey (1986) e Speer *et al* (1991) relacionam a distorção da maré com a capacidade que um sistema apresenta em reter água nos seus ambientes intermareais, mas também com o fenómeno de convergência definido pela variação longitudinal da relação largura/profundidade do estuário *sensus* Le Floch, 1961 *in* Borrego *et al* (1995).

Muito embora autores como Aubrey & Speer (1985), Friedrichs & Aubrey, 1988 e Dyer (1997) tenham relacionado a distorção da onda de maré como resultante de vários efeitos não lineares decorrentes da sua propagação em águas pouco profundas, neste trabalho foram considerados simplesmente comportamentos lineares uma vez pretenderem-se determinar as possíveis tendências de variação com a hidrodinâmica local e com os principais processos intervenientes na distorção dos escoamentos, nomeadamente com o atrito de fundo e com a distorção fluvial e com a distorção relacionada com a fisiografia. Para tal, começa-se por analisar a distorção total sofrida pelas componentes horizontal e vertical dos diferentes ciclos de maré

aferidos nas quatro estações do estuário, representada pela relação de amplitudes (M_4/M_2) ocorrida entre as duas principais constituintes harmónicas, de natureza astronómica e de baixa profundidade do estuário. Foram descritas várias tendências de variação acontecidas entre (M_4/M_2) e os principais agentes hidrodinâmicos em análise. Seguidamente, analisa-se a distorção sofrida pelos escoamentos em várias fases da maré (na preia-mar, na baixa-mar) e são descritas tendências de variação de Ø relativamente ás variações da superfície livre e das magnitudes dos caudais fluviais, para os diferentes sectores do estuário. Por fim, é feita uma análise da distorção ocorrida ao longo da coluna de água, nas quatro estações do estuário para as fases da PM e da BM, e relacionada com os principais processos intervenientes na distorção dos escoamentos. No final do capítulo 5, é feita uma síntese dos resultados obtidos mais relevantes para a distorção da onda de maré no estuário.

5.3.5.1. Distorção Total da Maré

De acordo com Baptista (1990) e Baptista *et al* (1995), M_2 representou à constituinte semidiurna dominante no estuário do Mondego, bem como, M_4 representou a constituinte principal tetradiurna a ser formada no interior do sistema associada à dissipação não linear da energia da onda de maré ao propagar-se neste ambiente pouco profundo. Este facto levou a considerar o parâmetro definido pela razão das amplitudes de M_4/M_2 como indicador da magnitude da assimetria da maré gerada no interior estuário, bem como, a relação ocorrida entre as fases destas duas constituintes, definida pela expressão $2M_2$-M_4, como determinante do tipo da assimetria da maré, de acordo Blanton *et al* (2002). Assim, para além das constituintes harmónicas de natureza astronómica, a onda de maré ao propagar-se no interior do estuário passou a apresentar oscilações harmónicas de curto período geradas pela fisiografia (Friedrichs & Aubrey, 1988). Esta relação biunívoca entre a distorção da maré e a morfologia do estuário terá sido responsável por variações específicas nas componentes vertical e horizontal da mesma, que se reflectiram quer na variação de vários parâmetros maregráficos, quer na relação das amplitudes e das fases das constituintes principais de natureza astronómica e de baixa profundidade (Tonda, 2000). O seu estudo reflecte-se

na maior importância para o entendimento da hidrodinâmica e para o conhecimento do transporte sedimentar num estuário (Speer *et al* 1991).

De acordo com Friedrichs & Aubrey (1988), Friedrichs & Madsen (1992), Dyer (1997), Blanton *et al* (2002) a relação obtida entre as amplitudes das constituintes M_4 e M_2 quantificou a distorção total sofrida pelos diferentes ciclos de maré aferidos no estuário. Quando confrontadas as relações da amplitudes M_4/M_2 das duas componentes da maré com os principais agentes dinâmicos em análise, obtiveram-se correlações muito boas e positivas, permitindo associar um aumento da distorção dos escoamentos para as diferentes estações a quadros hidrodinâmicos mais elevados.

Componente Vertical da Maré

As regressões obtidas entre a distorção da componente vertical da maré $[(M_4/M_2)_\eta]$ e a variação da magnitude dos caudais fluviais foram positivas, muito boas (com $r_{Emb,Qr}$=0.85, $r_{5I,Qr}$=0.95 e $r_{EE,Qr}$=0.999) e significativas apenas para as estações do canal principal do estuário, tendo sido representadas pelas equações expressas no gráfico da figura 5.3.5. 1. Para a estação da Gala não se registou qualquer tendência de variação.

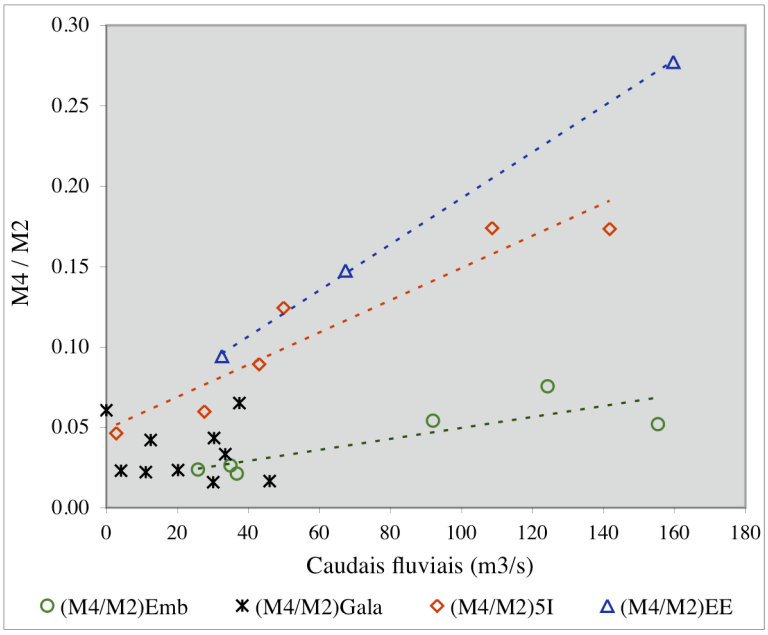


Figura 5.3.5. 1. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela componente vertical $[(M_4/M_2)_\eta]$ dos diversos ciclos de maré aferidos nas quatro estações do estuário, com a variação dos caudais fluviais registados em cada uma delas. Na legenda, $(M_4/M_2)_{Emb}$, $(M_4/M_2)_{Gala}$, $(M_4/M_2)_{5I}$ e $(M_4/M_2)_{EE}$ representaram as distorções registadas nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. As

regressões obtidas foram descritas por $(M_4/M_2)_{Emb,\eta,Qr\leq155m^3/s}=0.0003*Q_{r,Emb}+0.0154$ com $r^2_{Emb,Qr}=0.72$, $r_{Emb,Qr}=0.85$, $p<0.05$, $t_{D\text{-}W,Emb,Qr}=2.1$, $N_{Emb}=6$; $(M_4/M_2)_{5I,\eta,Qr\leq142m^3/s}=0.0001*Q_{r,5I}+0.0488$ com $r^2_{5I,Qr}=0.90$, $r_{5I,Qr}=0.95$, $p<0.01$, $N_{5I}=6$; $(M_4/M_2)_{EE,\eta,Qr\leq160m^3/s}=0.0014*Q_{r,EE}+0.0491$ com $r^2_{EE,Qr}=0.999$, $r_{EE,Qr}=0.999$, $p<0.05$, $N_{EE}=3$. Os valores de $1.7\leq t_{DW}\leq2.4$ atestam a independência destas variáveis.

Quando relacionadas as distorções $(M_4/M_2)_\eta$ com a variação da altura da maré, para cada uma das estações em análise, foram obtidas e descritas regressões positivas, com coeficientes de correlação de $r_{Emb,Aw}=0.81$, $r_{Gala,Aw}=0.63$ e $r_{5I,Aw}=0.77$ para as estações da Embocadura, Gala e Cinco Irmãos, tendo sido estatisticamente significativas apenas as duas primeiras, como se representa no gráfico da figura 5.3.5. 2. Na estação Elevatória as magnitudes de $(M_4/M_2)_{EE,\eta}$ não descreveram qualquer tendência de variação significativa com $A_{w,EE}$.

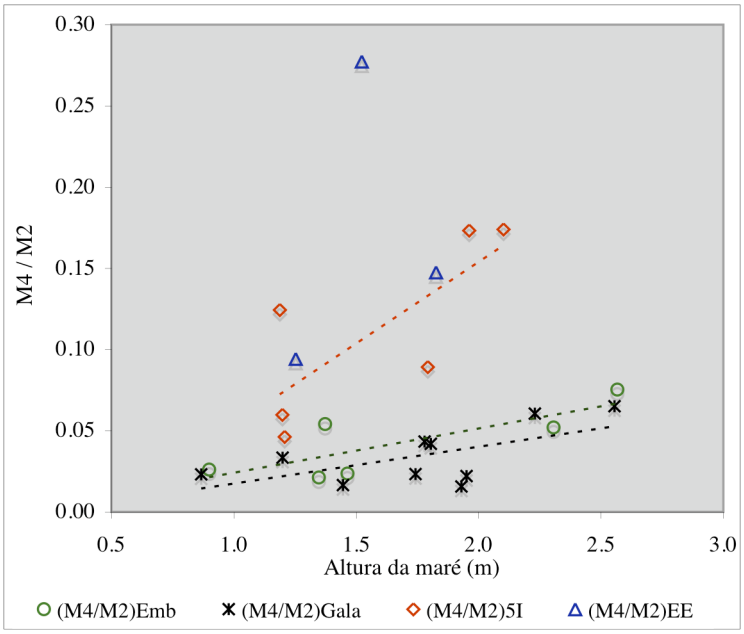


Figura 5.3.5. 2. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela componente vertical da maré $[(M_4/M_2)_\eta]$ e a variação da altura da maré, para as diferentes estações do estuário. Na legenda, $(M_4/M_2)_{Emb}$, $(M_4/M_2)_{Gala}$, $(M_4/M_2)_{5I}$ e $(M_4/M_2)_{EE}$ representaram as distorções registadas nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. As regressões obtidas foram descritas por: $(M_4/M_2)_{Emb,\eta,Qr\leq155m^3/s}=0.0272*A_{w,Emb}+0.0031$ com $r^2_{Emb,Aw}=0.64$, $r_{Emb,Aw}=0.81$, $p<0.05$, $t_{D\text{-}W,Emb,Aw}=2.1$, $N_{Emb}=6$; $(M_4/M_2)_{Gala,\eta,Qr\leq46m^3/s}=0.0226*A_{w,Gala}-0.0051$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.39$, $r_{Gala,Aw}=0.63$, $p<0.05$, $N_{Gala}=10$; $(M_4/M_2)_{5I,\eta,Qr\leq142m^3/s}=0.1005*A_{w,5I}-0.047$ com $r^2_{5I,Aw}=0.59$, $r_{5I,Aw}=0.77$, $N_{5I}=6$. Estas variáveis foram consideradas independentes, uma vez que $1.6\leq t_{D\text{-}W}\leq2.2$.

Para quadros hidrodinâmicos regidos por alturas de maré compreendidas entre os $0.9\leq A_w\leq2.5$m e caudais do Mondego inferiores a $Q_r\leq160m^3/s$, estas regressões ilustraram para as diferentes estações, distorções compreendidas entre os $0.02<(M_4/M_2)_{Gala,\eta}<0.05$, entre os $0.02<(M_4/M_2)_{Emb,\eta}<0.06$, entre os $0.05<(M_4/M_2)_{5I,\eta}<0.21$ e entre os $0.05<(M_4/M_2)_{EE,\eta}<0.27$. Estas

também permitiram definir distorções médias de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Gala,\eta}$≈0.03, $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Emb,\eta}$≈0.04 e de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{5I,\eta}$≈0.13 e de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{EE,\eta}$≈0.17, respectivamente. Estes resultados para além de terem reflectido distorções da componente vertical da maré mais elevadas sob marés de maior amplitude e/ou sob maiores descargas fluviais, ainda associaram as maiores magnitudes de $(M_4/M_2)_\eta$ aos sectores mais interiores do canal principal do estuário com $(M_4/M_2)_{EE,\eta}>(M_4/M_2)_{5I,\eta}>(M_4/M_2)_{Emb,\eta}]$, como se ilustra na figura 5.3.5. 1. As regressões obtidas entre (M_4/M_2) com Q_r também definiram coeficientes de determinação tendencialmente mais elevados para as estações mais interiores do canal principal, que por sua vez ainda foram mais elevados aos obtidos com A_w (com $r^2_{Emb,Qr}>r^2_{Emb,Aw}$; $r^2_{5I,Qr}>>r^2_{5I,Aw}$; $r^2_{EE,Qr}>>>r^2_{EE,Aw}$). Desta forma, levou a considerar uma maior influência dos caudais do Mondego na distorção da componente vertical da maré (distorção fluvial), que terá sido mais significativa para os sectores mais interiores deste canal, em prejuízo da importância relativa da distorção associada à propagação da maré. Relativamente à estação do braço sul, verificou-se que as magnitudes de $(M_4/M_2)_{Gala,\eta}$ foram um pouco mais baixas às registadas na $(M_4/M_2)_{Emb,\eta}$, em parte justificadas por as primeiras não terem reflectido um acréscimo da componente da distorção fluvial, dado que os caudais do rio Pranto apresentaram magnitudes muito inferiores às do Mondego. A ausência de qualquer tipo de correlação entre $(M_4/M_2)_{Gala,\eta}$ e $Q_{r,Gala}$ apontou para que os caudais do Pranto tenham tido uma contribuição pouco relevante na distorção da variação da sua superfície livre da estação da Gala.

Um modelo de regressão múltipla significativo foi obtido entre $(M_4/M_2)_{Emb,\eta}$ com $Q_{r,Emb}$ e $A_{w,Emb}$, permitindo estimar a distorção da componente vertical da maré nesta estação mais distal do estuário para condições hidrodinâmicas de $0.9\leq A_{w,Emb}\leq 2.6$m e $Q_{r,Emb}\leq 155 m^3/s$. Passou a explicar cerca de 87% da variabilidade da distorção da variação da superfície livre, tendo sido representada pela expressão: $(M_4/M_2)_{Emb,\eta}=0.07+0.43*A_{w,Emb}+0.001*Q_{r,Emb}$, com $r^2_{Emb,Qr,Aw}=0.87$, $r_{Emb,Qr,Aw}=0.96$,

$p<0.05$, $t_{D\text{-}W,Emb}=2.2$, $N_{Emb}=12$. O teste de Durbin-Watson confirmou a independência destas variáveis.

As distorções médias da componente vertical da maré determinadas para as estações anteriores quando comparadas com as magnitudes das distorções calculadas no item 5.1.4 apartir das constituintes harmónicas de Baptista *et al* (1990), mostraram ter sido coincidentes ou então concordantes entre si no caso de terem sido representativas de estações com diferentes localizações geográficas no estuário. Para as estações destes dois métodos que praticamente coincidiram localmente neste sistema, verificou-se que as distorções apresentadas por elas exibiram magnitudes iguais, com $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Emb,\eta} \approx (M_4/M_2)_{est,4}=0.04$, com $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Gala,\eta} \approx (M_4/M_2)_{est,5}=0.03$ e com e $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{EE,\eta} \approx (M_4/M_2)_{est,1}=0.17$. No caso de não ter havido sobreposição geográfica, como foi exemplo a estação dos Cinco Irmãos que se localizou entre as estações 2 e 3 (como se depreende da análise das figuras 3.1 e 4.2), constatou-se que a relação de amplitudes ostentada por aquela estação de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{5I,\eta} \approx 0.13$ encontrou-se também compreendida entre $(M_4/M_2)_{est,3}=0.07$ e $(M_4/M_2)_{est,2}=0.17$, bem como, enquadrou-se na tendência definida por estas, de aumento longitudinal da magnitude da distorção da variação da superfície livre para montante ao longo do canal principal do estuário. Tendo esta semelhança de magnitudes de M_4/M_2 registada nos diferentes sectores do estuário reflectido séries de dados maregráficos, metodologias de campo e tratamentos matemáticos completamente distintos, então estes resultados para além de terem sido concordantes, corroboraram-se mutuamente, reforçando mesmo a qualidade dos mesmos quanto à reprodução dos fenómenos naturais ali intervenientes. Também permitiram validar em parte a abordagem metodológica adoptada para a obtenção das séries de dados maregráficos correspondentes a ciclos unitários de maré, bem como, ao respectivo processamento matemático dos mesmos.

Componente Horizontal da Maré

As distorções determinadas para a componente horizontal dos diferentes ciclos de maré representadas pelo parâmetro [$(M_4/M_2)_u$], quando relacionadas com a variação da magnitude dos caudais fluviais descreveram regressões muito boas, positivas, para as estações do canal principal do estuário, de acordo com a figura 5.3.5. 3. Contudo, estas foram significativas unicamente para as estações da Embocadura e dos Cinco Irmãos.

Para caudais fluviais inferiores a $Q_{r,Mondego} \leq 160 m^3/s$, estas regressões expuseram distorções para a velocidade compreendidas entre os $0.11 < (M_4/M_2)_{Emb,u} < 0.21$, os $0.12 < (M_4/M_2)_{5I,u} < 0.37$ e os $0.21 < (M_4/M_2)_{EE,u} < 0.47$, que representaram distorções médias de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Emb,u} \approx 0.16$, de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{5I,u} \approx 0.25$ e de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{EE,u} \approx 0.35$, respectivamente. Estas, foram muito superiores às distorções registadas com a componente vertical, tendo sido 4 vezes mais elevadas na Embocadura e 2 vezes superiores nas estações dos Cinco Irmãos e Elevatória. Permitiram também relacionar o aumento da distorção da velocidade e consequentemente o incremento dos desfasamentos entre as duas componentes da maré, com a propagação dos escoamentos nos diferentes sectores do estuário, bem como, com a distorção imposta pelos caudais fluviais. Desta forma, para além de se terem registado maiores distorções da velocidade sob maiores caudais do Mondego, estas, também foram tendencialmente mais elevadas para os sectores mais interiores do canal principal, de acordo com a figura 5.3.5. 3.

Na estação da Gala, a nuvem de pontos obtida não apontou para qualquer tendência de variação acontecida entre $(M_4/M_2)_{u,Gala}$ e $Q_{r,Gala}$, em grande parte justificada pelos baixos caudais do rio Pranto registados ($Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$). Poderá também ter contribuído um eventual efeito de sombra gerado por outras componentes intervenientes na distorção dos escoamentos de maior magnitude, neste canal periférico, pouco profundo e de complexa fisiografia. Nomeadamente, o atrito de fundo, os fenómenos de amortecimento e de convergência e a retenção de água nas extensas áreas

intermareais dos sectores médio-proximais do braço sul. Um outro aspecto a ponderar, relacionou-se com o facto de parte da massa de água que passou por esta estação durante a enchente, proveniente da embocadura, foi drenada para o braço norte nos Cinco Irmãos pela confluência proximal dos dois braços do estuário. Consequentemente, os caudais do Pranto estimados para a estação da Gala poderão ter sido ligeiramente subestimados pelo método adoptado, aquando das marés de maior amplitude.

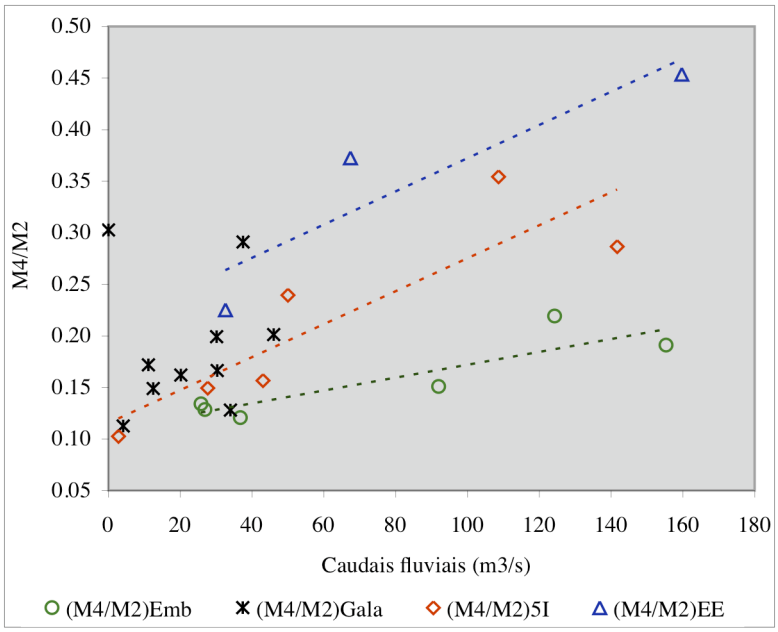


Figura 5.3.5. 3. Regressões definidas entre a componente horizontal da maré [$(M_4/M_2)_u$] e as descargas fluviais (Q_r) registadas nas diferentes estações do estuário. Na legenda $(M_4/M_2)_{Emb}$, $(M_4/M_2)_{Gala}$, $(M_4/M_2)_{5I}$ e $(M_4/M_2)_{EE}$ representaram as distorções registadas nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Estação Elevatória. As regressões obtidas foram descritas na Embocadura por $(M_4/M_2)_{Emb,u,Qr\leq155m^3/s}=0.0006*Q_{r,Emb}+0.1094$ com $r_{Emb,Qr}=0.88$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; nos Cinco Irmãos por $(M_4/M_2)_{5I,u,Qr\leq142m^3/s}=0.0016*Q_{r,5I}+0.1153$ com $r_{5I,Qr}=0.88$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$ e por $(M_4/M_2)_{EE,u,Qr\leq160m^3/s}=0.0016*Q_{r,EE}+0.2113$ com $r_{EE,Qr}=0.91$, $N_{EE}=3$. Os valores de $1.7\leq t_{-DW}\leq2.7$ apontaram para a independência das variáveis.

A distorção da componente horizontal $(M_4/M_2)_u$ também descreveu relações directas e proporcionais com a variação da altura da maré em todas as estações do estuário, como se representa no gráfico da figura 5.3.5. 4. Para as estações da Embocadura e da Gala, as correlações obtidas foram significativas, enquanto para as restantes definiram apenas tendências de variação. Os coeficientes de correlação auferidos nestas regressões decresceram tendencialmente para as estações mais interiores do estuário.

Para marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_w \leq 2.6$m, estes resultados descreveram distorções na velocidade compreendidas entre os $0.11 < (M_4/M_2)_{Emb,u} < 0.21$ e os $0.11 < (M_4/M_2)_{Gala,u} < 0.27$, com distorções médias de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Emb,u} \approx 0.16$ e de $\left(\overline{M_4/M_2}\right)_{Gala,u} \approx 0.27$, respectivamente. Na estação da Gala, a distorção da componente horizontal foi 6 vezes mais elevada à registada anteriormente com a variação da superfície livre, tendo reflectido desta forma, um maior retardamento da velocidade dos escoamentos aquando da propagação da maré neste braço periférico, pouco profundo, e concordante com a distorção pelo atrito de fundo. No estuário, as magnitudes mais pequenas de $(M_4/M_2)_u$ localizaram-se na Embocadura, muito embora sob marés mortas, $(M_4/M_2)_{Emb,u}$ e $(M_4/M_2)_{Gala,u}$ tenham sido da mesma ordem de grandeza (figura 5.3.5. 4). A distorção $(M_4/M_2)_u$ tendeu a aumentar para as estações mais interiores do estuário.

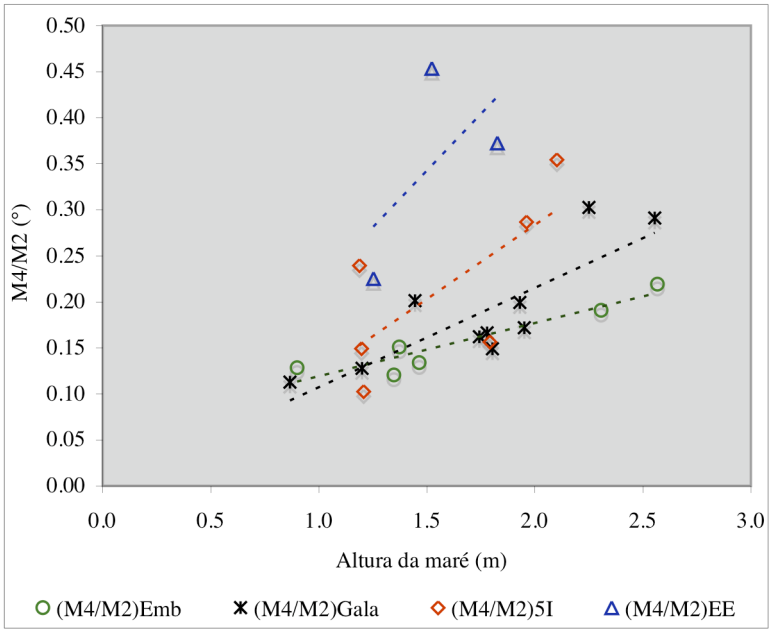


Figura 5.3.5. 4. Variações da distorção sofrida pela componente horizontal $[(M_4/M_2)_u]$ dos ciclos de maré aferidos nas quatro estações do estuário, com a variação da altura da maré. As regressões obtidas foram caracterizadas para a Embocadura por $(M_4/M_2)_{Emb,u,Qr\leq155m^3/s}=0.0578*A_{w,Emb}+0.0614$ com $r^2_{Emb,Aw}=0.88$, $r_{Emb,Aw}=0.94$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; para a Gala por $(M_4/M_2)_{Gala,u,Qr\leq46m^3/s}=0.108*A_{w,Gala}-0.0009$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.69$, $r_{Gala,Aw}=0.83$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$; para os Cinco Irmãos por $(M_4/M_2)_{5I,u,Qr\leq142m^3/s}=0.161*A_{w,5I}-0.0387$ com $r^2_{5I,Aw}\approx0.51$, $r_{5I,Aw}=0.72$, $N_{5I}=6$; e para a Estação Elevatória por $(M_4/M_2)_{EE,u,Qr\leq160m^3/s}=0.246*A_{w,EE}-0.0269$ com $r^2_{EE,Aw}=0.37$, $r_{EE,Aw}=0.61$, $N=3$. Os resultados de $1.6\leq t_{-DW}\leq2.7$ atestam a independência destas variáveis.

Desta forma, foi possível expressar $(M_4/M_2)_{u,Emb}$ com base nas magnitudes dos principais agentes de transporte responsáveis quer pelo atrito gerado entre o escoamentos e o fundo do canal,

quer pela distorção de natureza fluvial. Os coeficientes de determinação obtidos nas regressões descritas anteriormente, indicaram para a estação da Embocadura que cerca de 88% da variabilidade de $(M_4/M_2)_{u,Emb}$ foi explicada por $A_{w,Emb}$, enquanto 77% desta foi explicada por $Q_{r,Emb}$, pelo que se considerou uma maior importância relativa por parte da maré na distorção de $(M_4/M_2)_{u,Emb}$. Obtido um modelo de regressão múltipla de $(M_4/M_2)_{u,Emb}$ em função de $A_{w,Emb}$ e de $Q_{r,Emb}$, representado pela expressão significativa 5.3.1, verificou-se que este passou a explicar 92% da variabilidade de $(M_4/M_2)_{u,Emb}$, e a corroborar o domínio de $A_{w,Emb}$ na distorção da componente horizontal dos escoamentos nesta estação.

$$(M_4/M_2)_{Emb,u} = 0.07+0.43*A_{w,Emb}+0.001*Q_{r,Emb} \quad (\text{para } 0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6\text{m e } Q_{r,Emb} \leq 155\text{m}^3/\text{s}) \qquad (5.3.1)$$

Na estação da Gala, verificou-se que cerca de 69% da variabilidade de $(M_4/M_2)_{u,Gala}$ foi explicada por $A_{w,Gala}$, pelo que se considerou que parte da distorção da componente horizontal nesta estação, esteve associada à propagação da maré. Uma outra componente que terá contribuído para a variabilidade de $(M_4/M_2)_{u,Gala}$, mas muito difícil de ser parametrizada, terá correspondido à distorção imposta pela fisiografia deste subsistema estuarino, de acordo com Friedrichs & Aubrey (1988) e Friedrichs *et al* (1990). A ausência de regressões significativas ocorridas entre $(M_4/M_2)_{u,Gala}$ e os caudais do Pranto, levaram a ponderar uma importância relativa muito pequena na alteração das velocidades dos escoamentos por parte da distorção fluvial.

5.3.5.2. Distorção da Maré na PM

Feita a analise da distorção total sofrida pelos diferentes ciclos de maré nos diversos sectores do estuário, pretendeu-se também estudar o comportamento da distorção sofrida pelos escoamentos em diferentes fases de cada período de maré. Para tal, consideraram-se os atrasos ocorridos entre a componente horizontal[1] e a variação da superfície livre nas fases de maior altura da coluna de água ($Ø_{PM,m}$), e na fase de menor altura da coluna de água ($Ø_{BM,m}$), uma vez que estas

[1]. Representada pela velocidade média dos escoamentos.

reflectiram a distorção acumulada durante as fases da enchente e vazante, respectivamente (Blanton & Andrade, 2001).

Pretendendo-se avaliar as eventuais tendências de variação ocorridas entre a distorção dos escoamentos aquando da preia-mar ($Ø_{PM,m}$) e as variações das alturas da maré registadas nas quatro estações do estuário, elaborou-se o gráfico da figura 5.3.5. 5. Este, ilustrou regressões muito boas e estatisticamente significativas para as estações da Embocadura e Gala, que foram respectivamente negativa e positiva considerando todos os ciclos de maré. Nas restantes estações do estuário, obtiveram-se correlações boas, mas não significativas entre $Ø_{PM,m}$ e A_w, que foram negativa para os Cinco Irmãos e positiva para a Estação Elevatória.

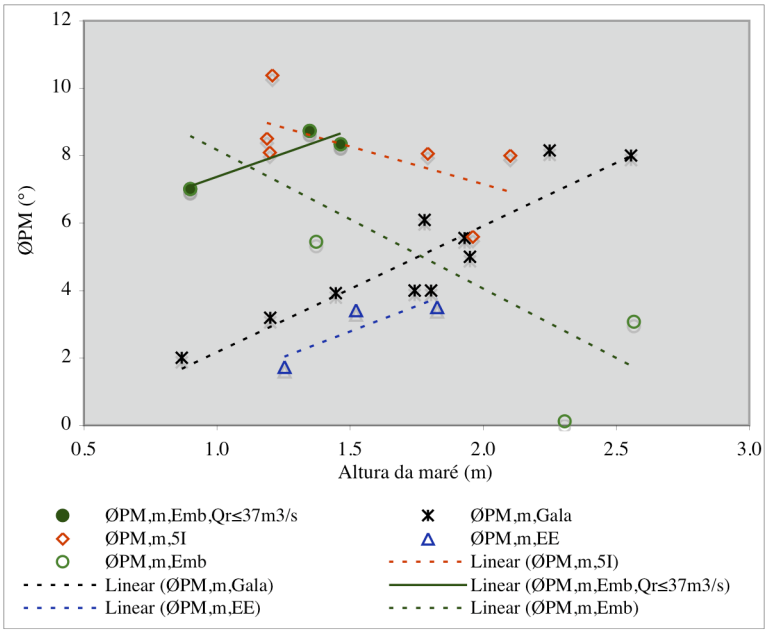


Figura 5.3.5. 5. Regressões obtidas entre a distorção média sofrida pelos escoamentos na preia-mar ($Ø_{PM,m}$) e a variação da altura da maré (A_w), nas diferentes estações do estuário. A distorção $Ø_{PM,m}$, foi descrita pelo atraso expresso em graus que a estofa da preia-mar apresentou relativamente à PM. As regressões obtidas foram definidas por: $Ø_{PM,Emb,Qr\leq155m^3/s}=-4.1148*A_{w,Emb}+12.283$ com $r^2_{Emb,Aw}=0.66$, $r_{Emb,Aw}=-0.81$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$; por $Ø_{PM,m,Gala,Qr\leq46m^3/s}=3.7455*A_{w,Gala}-1.5737$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.85$, $r_{Gala,Aw}=0.92$, $p<0.01$, $N_{Gala}=10$. Nos Cinco Irmãos obteve-se $Ø_{PM,5I,Qr\leq142m^3/s}=-2.2433*A_{w,5I}+11.638$ com $r^2_{5I,Aw}=0.39$, $r_{5I,Aw}=-0.62$, $N_{5I}=6$, enquanto na Est. Elevatória $r^2_{EE,Aw}=0.76$, $r_{EE,Aw}=0.87$, $N_{EE}=3$. Na legenda, $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m3/s}$ representou as distorções registadas na Embocadura para os ciclos de maré regidos por caudais do Mondego inferiores a $Q_r\leq37m^3/s$. Considerando-se apenas estes baixos regimes, obteve-se na Embocadura uma regressão definida por: $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m^3/s}\approx2.7762*A_{w,Emb}+4.5939$ com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.85$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.92$, $N_{Emb}=3$. Os de $1.8\leq t_{-DW}\leq2.8$ validaram a independência destas variáveis.

As referidas regressões significativas, definiram para marés compreendidas entre os $0.9\leq A_w\leq2.5$m, distorções de $8.6°\geq Ø_{PM,m,Emb}\geq2.0°$ e de $1.8°<Ø_{PM,m,Gala}<7.8°$, com magnitudes médias

respectivas de $\bar{Ø}_{PM,m,Emb} \approx 5.3°$ e de $\bar{Ø}_{PM,m,Gala} \approx 4.8°$. Permitiram também realçar que as distorções nesta fase, apresentaram-se ligeiramente superiores na estação da Embocadura.

Quando relacionadas as distorções $Ø_{PM,m}$ com os caudais fluviais, registaram-se para as estações da Embocadura e Cinco Irmãos regressões negativas e estatisticamente significativas, definidas respectivamente no gráfico da figura 5.3.5. 6. Na Estação Elevatória a correlação obtida foi positiva e boa, mas não significativa, enquanto na Gala não se obteve qualquer tendência de variação. Sob caudais do Mondego inferiores a $Q_r \leq 160 m^3/s$, expuseram distorções compreendidas entre os $9.9° \geq Ø_{BM,m,Emb} \geq 0.6$, $9.7° \geq Ø_{PM,m,5I} \geq 5.7°$ e os $2.0° \leq Ø_{PM,m,EE} \leq 3.6°$, que representaram distorções médias de $\bar{Ø}_{PM,m,Emb,Qr \leq 155m3/s} \approx 5°$, de $\bar{Ø}_{PM,m,5I} \approx 7.6°$ e de $\bar{Ø}_{PM,m,EE} \approx 2.9°$, respectivamente.

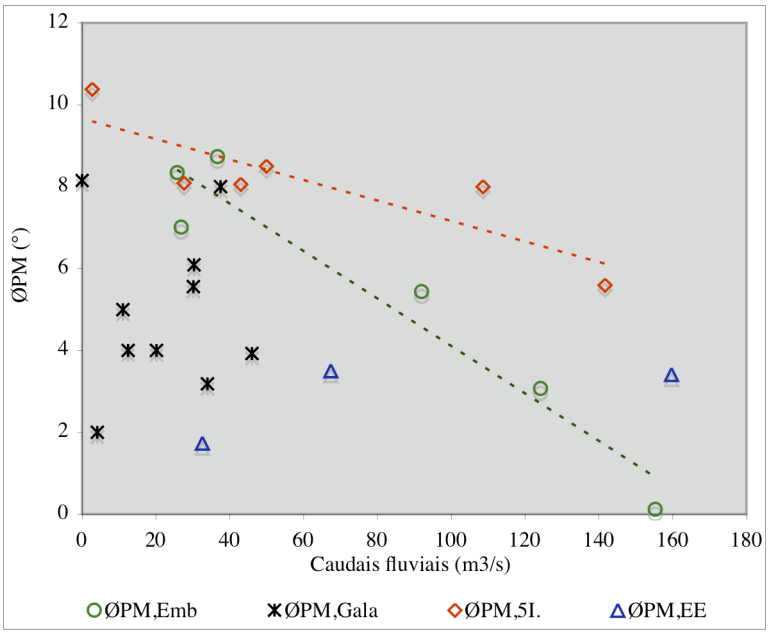


Figura 5.3.5. 6. Tendências de variação ocorridas entre a distorção sofrida pelos escoamentos na preia-mar ($Ø_{PM,m}$) e as magnitudes das descargas fluviais (Q_r), nas diferentes estações do estuário. As regressões obtidas foram representadas na Embocadura por $Ø_{PM,m,Emb,Qr \leq 155m^3/s} = -0.0579 * Q_{r,Emb} + 9.9022$ com $r^2_{Emb,Qr} = 0.92$, $r_{Emb,Qr} = -0.96$, $p < 0.01$, $N_{Emb} = 6$ e nos Cinco Irmãos por $Ø_{PM,m,5I,Qr \leq 142m3/s} = -0.025 * Q_{r,5I} + 9.6627$ com $r^2_{5I,Qr} = 0.74$, $r_{5I,Qr} = -0.86$, $p < 0.05$, $N_{5I} = 6$.

Uma vez que as magnitudes da $Ø_{PM,m}$ reflectiram a distorção de toda a coluna de água, nesta fase terminal da enchente, os resultados obtidos na estação da Embocadura apontaram para que $Ø_{PM,m,Emb}$ tenha apresentado uma tendência de variação negativa com os dois agentes dinâmicos em análise, definindo assim, atrasos da estofa da PM tendencialmente mais pequenos relativamente à PM, sob maiores $Q_{r,Emb}$ e/ou maiores $A_{w,Emb}$. Contudo, este comportamento foi característico da

distorção induzida pelos caudais fluviais nesta fase da maré, ao antecipar a estofa da PM relativamente à PM. Comportamento contrário, seria característico da acção do atrito de fundo, responsável pelo incremento do atraso da estofa da PM relativamente à PM (Dyer, 1997). Desta forma, a tendência de variação negativa de $Ø_{PM,m,Emb}$ registada, terá reflectido um domínio da componente da distorção fluvial (de maior magnitude relativa), que camuflou a distorção induzida pelo atrito de fundo, aliada, com a simultaneidade casual de os maiores caudais do Mondego registados terem coincido com as marés de maior amplitude nas estações da Embocadura e nos Cinco Irmãos. Este fenómeno foi também corroborado com a análise dos coeficientes de determinação obtidos, que apontaram para que 92% e para apenas 66% da variabilidade de $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq 15m^3/s}$ tenham sido explicados, respectivamente por $Q_{r,Emb}$ e por $A_{w,Emb}$, atribuindo uma importância relativa superior aos caudais do Mondego na distorção dos escoamentos nesta fase. As observações de campo também foram de encontro a esta apreciação, com o registo de frentes dinâmicas ocorridas entre as massas de água marinha e a estuarina nesta fase da maré e representadas nas figuras 5.3.1.9, 5.3.1.14, 5.3.1.17 e à semelhança do considerado por Blanton *et al* (2000) para o estuário do Mira.

Tendo por objectivo, poder expressar os diferentes valores de $Ø_{PM,m,Emb}$ medidos na estação da Embocadura simultaneamente em função de $A_{w,Emb}$ e de $Q_{r,Emb}$, testou-se um modelo de regressão múltipla, que se apresentou significativo, e passou a explicar 93% da variabilidade de $Ø_{PM,m,Emb}$ por intermédio da recta de regressão 5.3. 2. Este, ostentou $r^2_{Emb,Aw,Qr}$=0.93, $r_{Emb,Aw,Qr}$=0.96, p<0.05, N_{Emb}=6, e corroborou o domínio por parte dos caudais fluviais na distorção dos escoamentos nesta fase da maré, para as condições hidrodinâmicas estudadas.

$$Ø_{PM,m,Emb} = 9.418\text{-}0.063*Q_{r,Emb}+0.514*A_{w,Emb} \quad (\text{para } 0.9\leq A_{w,Emb}\leq 2.6m \text{ e } Q_{r,Emb}\leq 155m^3/s) \qquad (5.3.2)$$

O efeito gerado pelo atrito de fundo nesta fase da maré, pode ser avaliado qualitativamente considerando apenas os resultados de $Ø_{PM,m,Emb}$ regidos por caudais do Mondego baixos ($Q_r\leq 37m^3/s$), ou seja, não ponderando os três ciclos de maré realizados sob caudais fluviais

compreendidos entre os $92 \leq Q_r \leq 155 m^3/s$ e que representaram as marés de altura superior a $A_w \geq 2.3m$ (figura 5.3.5. 5). Neste quadro hidrodinâmico, a distorção $Ø_{PM,m}$ passou a descrever uma regressão positiva com $A_{w,Emb}$, mas não significativa face ao reduzido número de leituras, apontando para magnitudes compreendidas entre os $7.1° \leq Ø_{PM,m,Emb} \leq 11.5°$, com uma magnitude média de $\bar{Ø}_{PM,m,Emb,Qr\leq 37m3/s} \approx 9.3°$, para as alturas compreendidas entre os $0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.5m$. Este comportamento da distorção foi concordante com o efeito dinâmico gerado com a entrada da maré e sua consequente interacção com o fundo do canal, no sentido de ter gerado maiores atrasos da estofa da PM relativamente à PM sob marés de maior altura. Representou igualmente, um decréscimo da distorção $\bar{Ø}_{PM,m,Emb,Qr\leq 37m3/s}$ relativamente a $\bar{Ø}_{PM,m,Emb,Qr\leq 155m3/s}$, uma vez que o atrito de fundo e a distorção fluvial, nesta fase, actuaram nos escoamentos em sentidos contrários, tendo a sua acção conjunta atenuado a magnitude de $Ø_{PM,m}$. Este modelo de regressão simples determinado para baixos regimes fluviais, também apontou que $A_{w,Emb,Qr\leq 37m3/s}$ tenha passado a descrever 85% da variabilidade de $Ø_{PM,m,Emb}$, e reflectido desta forma, um aumento da importância relativa por parte da maré, quando comparado com os resultados obtidos aquando de maiores caudais do Mondego (com $r^2_{Aw,Emb,Qr\leq 155m3/s}=0.66$).

Os resultados obtidos na estação dos Cinco Irmãos descreveram uma tendência de variação inversamente proporcional entre $Ø_{PM,m,5I}$ com $A_{w,5I}$ (e com $Q_{r,5I}$), concordante com o efeito gerado pela distorção fluvial que se sobrepôs ao efeito gerado pela propagação da maré, mesmo considerando apenas as distorções $Ø_{PM,m,5I}$ dos ciclos de maré regidos por regimes do Mondego inferiores a $Q_r \leq 50 m^3/s$. Só sob caudais fluviais inferiores a $Q_{r,5I} \leq 28 m^3/s$ se registaram tendências de variação de $Ø_{PM,m,5I}$ concordantes com o atrito de fundo. Estes resultados apontaram para um aumento da importância relativa por parte dos caudais fluviais na distorção de $Ø_{PM,m,5I}$ e paralelamente para um decréscimo da influência da maré, neste sector mais interno do estuário, descrito por uma profundidade média de $\bar{h}_{PM} \approx 4.2m$ e distanciado 7.5km da foz. Estes resultados foram igualmente suportados por 74% da variabilidade de $Ø_{PM,m,5I}$ por parte de $Q_{r,5I}$, contra apenas

38% por parte da variação da altura da maré. Relativamente à distorção registada na Embocadura ($Ø_{PM,m,Emb}$) estes resultados apontaram para um aumento médio de 2.5° (ou de $\Delta Ø_{PM,m,x,b.norte} \approx 0.08h$) na distorção de $Ø_{PM}$ ao longo do braço norte (figura 5.3.5. 5).

Na Estação Elevatória, e à semelhança da estação anterior, as correlações negativas obtidas entre $Ø_{PM,m,EE}$ com $A_{w,EE}$, quer com $Q_{r,EE}$, descreveram tendências de variação de $Ø_{PM,m,EE}$ reguladas fundamentalmente pelos caudais do Mondego. A variabilidade de $Ø_{PM,EE}$ foi explicada em 76% por parte de $Q_{r,EE}$ e apenas em 46% por parte de $A_{w,EE}$.

Na estação da Gala, a inexistência de qualquer tendência de variação de $Ø_{PM,m}$ com os caudais do Pranto, conciliada com uma correlação positiva muito elevada e significativa de $Ø_{PM,m,Gala}$ com $A_{w,Gala}$, apontaram para que a distorção dos escoamentos nesta fase terminal da enchente tenha sido regulada em grande parte pela acção da maré, bem como, a variação de $Ø_{PM,Gala}$ tenha sido concordante com a acção do atrito de fundo, à semelhança do considerado por Blanton & Andrade (2001) e Blanton *et al* 2002) (figuras 5.3.5. 5 e 5.3.5. 6). Estes resultados, apontaram para que 85% da variabilidade de $Ø_{PM,m,Gala}$ tenha sido explicada por $A_{w,Gala}$. Importa realçar que o sector distal do braço sul localizado a jusante desta estação foi descrito fisiograficamente como um troço de canal completamente regularizado quase rectilíneo, de largura regular, com secção trapezoidal, e caracterizado por um decréscimo gradual da batimetria dos ≈-5mZH à entrada para os ≈-1.5mZH na ponte da Gala, tendo apresentando duas pequenas barras intermareais marginais junto à estação da Gala (figura 2.2). Acresce o facto de as comportas da Quinta do Canal apenas terem sido abertas durante as fases da vazante e princípios da enchente, razão pela qual não se terem registado quaisquer tendências de variação de $Ø_{PM,m,Gala}$ com $Q_{r,Gala}$.

Para os sectores distais dos dois braços do estuário, verificou-se quando de baixos regimes fluviais ($Q_{r,Pranto} \leq 42 m^3/s$ e $Q_{r,Mondego} \leq 37 m^3/s$), que a variação de $Ø_{PM,m,Gala}$ foi muito semelhante à de $Ø_{PM,m,Emb}$ (as respectivas rectas de regressão definiram declives semelhantes, como se ilustra na figura 5.3.5. 5, mas apresentaram magnitudes inferiores, da ordem dos 4.4° (ou seja, com

$\Delta Ø_{PM,m,x,b.sul} \approx 0.15h$)). Este decréscimo da distorção de $Ø_{PM,m}$ ocorrido ao longo do sector distal do braço sul, com 1.5km de extensão, descreveu uma diminuição dos desfasamentos entre as duas componentes da maré até à estação da Gala, apontando igualmente para um atrito de fundo relativo, 1.9 vezes mais pequeno, e relacionado com o menor hidrodinamismo e com a fisiografia deste sector distal do estuário.

A análise dos resultados obtidos das $Ø_{PM,m}$ nos diferentes sectores do estuário permitiu descrever um comportamento combinado progressivo+estacionário para a propagação da onda de maré, nesta fase, que esteve relacionado com o atrito de fundo de acordo com Dyer (1997) e Blanton *et al* (2002). Contudo, sob a influência de caudais fluviais elevados, acresceu uma outra componente interveniente na distorção dos escoamentos nestas duas fases da maré, designada de distorção fluvial, que introduziu à propagação da onda de maré um comportamento combinado do tipo estacionário+progressivo+fluvial.

Sob caudais do Mondego pequenos, da ordem dos $Q_{r,Emb} \leq 37 m^3/s$, a propagação da onda de maré na estação da Embocadura apresentou um comportamento combinado estacionário+progressivo, de acordo com Dyer (1997) e Blanton *et al* (2002), que foi tendencialmente mais progressivo sob marés de maior amplitude (figuras 5.3.5. 5 e 5.3.5. 13). Ilustrou para marés mortas (com $A_w \leq 1.6m$) distorções da ordem dos $Ø_{PM,m,Emb} \leq 9.0°$, enquanto para marés vivas máximas de $A_{w,Emb} \approx 2.9m$ distorções de ordem dos $Ø_{PM,m,Emb} \approx 12.6°$ e uma magnitude média de $\bar{Ø}_{PM,m,Emb(1 \leq Aw \leq 2.5m, Qr \leq 37m3/s)} \approx 9.5°$, que foram concordantes com um aumento do atrito de fundo, segundo Dyer (1997). Contudo, para caudais do Mondego mais elevados (mas inferiores a $Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$), passou a descrever um comportamento tendencialmente mais estacionário para os caudais mais elevados, e a apresentar distorções de $Ø_{PM,m,Emb} \approx 7.0°$ para $Q_{r,Emb} \approx 50 m^3/s$ e de $Ø_{PM,m,Emb} \approx 1.2°$ para $Q_{r,Emb} \approx 150 m^3/s$, bem como, uma magnitude média relativa inferior de $\bar{Ø}_{PM,m,Emb(1 \leq Aw \leq 2.5m, Qr \leq 155m3/s)} \approx 5.1°$, que reflectiram um comportamento combinado estacionário+progressivo+fluvial, corroborado com a sucessiva antecipação da estofa da PM

relativamente à PM nesta estação. Nas estações dos Cinco Irmãos e Elevatória as variações de $Ø_{PM}$ obtidas, apontaram para comportamentos combinados do tipo estacionário+progressivo+fluvial, sob caudais do Mondego $Q_r \leq 160 m^3/s$ (figuras 5.3.5. 5, 5.3.5. 19 e 5.3.5. 20). Na primeira estação, aquando de caudais inferiores a $Q_{r,Emb} \leq 28 m^3/s$, também se inferiu uma tendência para um comportamento estacionário+progressivo, tal como admitido por Blanton *et al* (2002).

Para a estação do braço sul, a onda de maré nesta fase apresentou um comportamento quase estacionário sob marés mortas com distorções inferiores a $Ø_{PM,m,Gala} \leq 5.2°$ para marés de $A_w < 1.8m$, tendo reforçado o comportamento combinado estacionário+progressivo para maiores amplitudes, com distorções da ordem $Ø_{PM,m,Gala} \approx 9.2°$ para uma maré máxima de PMMax=3.5m, ou seja, de $A_{w,Gala} \approx 2.9m$ (figuras 5.3.5. 5 e 5.3.5. 16). Desta forma reflectiu uma distorção fundamentalmente relacionada com o atrito de fundo de acordo com Blanton *et al* (2002). Os resultados obtidos nesta estação também descreveram uma distorção média de $\bar{Ø}_{PM,m,Gala(1 \leq Aw \leq 2.5m)} \approx 5.0°$, que representou relativamente à distorção $\bar{Ø}_{PM,m,Emb(1 \leq Aw \leq 2.5m, Qr \leq 37m3/s)}$ da estação do sector distal do canal principal do estuário, um decréscimo $Ø_{PM,m}$, e consequentemente, uma diminuição relativa do atrito de fundo. Também realçaram o efeito de amortecimento de $Ø_{PM,m}$ gerado pelos caudais fluviais na Embocadura, ao descrever distorções médias da mesma ordem de grandeza aquando comparadas $\bar{Ø}_{PM,m,Gala(1 \leq Aw \leq 2.5m)}$ com $\bar{Ø}_{PM,m,Emb(1 \leq Aw \leq 2.5m, Qr \leq 155m3/s)}$.

5.3.5.3. Distorção da Maré na BM

Para as fases de menor altura da coluna de água, a distorção sofrida pelos escoamentos ($Ø_{BM,m}$) descreveu com a altura da maré, correlações lineares positivas, muito boas e estatisticamente significativas apenas para as estações da Embocadura e Cinco Irmãos (figura 5.3.5. 7).

Estas, para marés abrangidas entre os $1 \leq A_w \leq 2.5m$ ilustraram distorções directamente proporcionais a A_w e compreendidas entre os $13.5° \leq Ø_{BM,m,Emb} \leq 53.4°$ e os $10.5° \leq Ø_{BM,m,5I} \leq 50.7°$,

tendo sido representadas por magnitudes médias de $\bar{Ø}_{BM,m.Emb}$≈33.4° e de $\bar{Ø}_{BM,m,5I}$≈30.6°, respectivamente. Definiram para o braço norte, aumentos médios da $Ø_{BM,m}$ da ordem dos 2.7° por cada aumento de 0.1m na altura da maré, bem como, magnitudes de $Ø_{BM,m,Emb}$ apenas 2.8° (ou 0.09h) mais elevadas às de $Ø_{BM,m,5I}$.

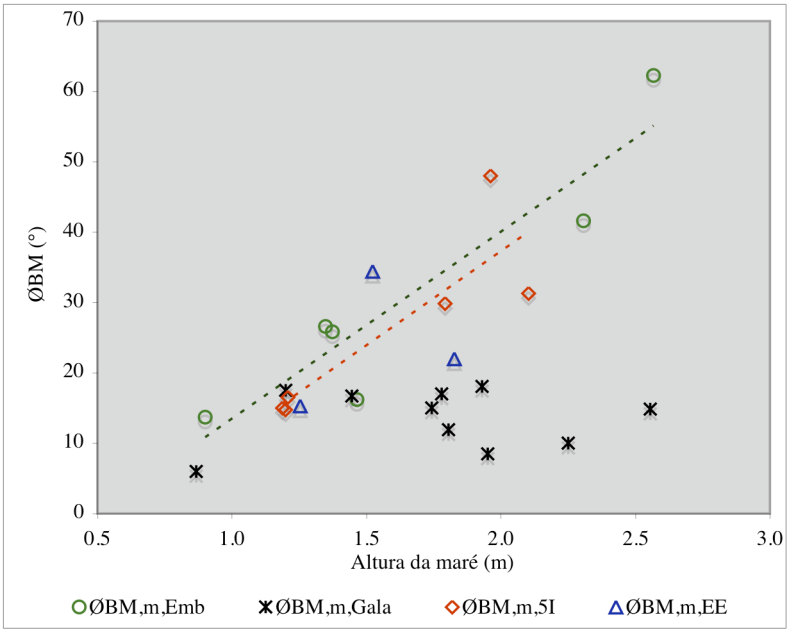


Figura 5.3.5. 7. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela maré na fase de menor altura da coluna de água ($Ø_{BM,m}$) e a variação da altura da maré, nas diferentes estações do estuário. A distorção $Ø_{BM,m}$ correspondeu ao atraso temporal ocorrido entre a estofa da baixa-mar e a BM, convertido em graus de acordo Dyer (1997). As regressões foram definidas, na Embocadura por $Ø_{BM,m,Emb,Qr≤155m^3/s}$=26.589*$A_{w,Emb}$-13.089 com $r^2_{Emb,Aw}$=0.87, $r_{Emb,Aw}$=0.93, p<0.01, N_{Emb}=6 e nos Cinco Irmãos por $Ø_{BM,m,5I,Qr≤142m^3/s}$=26.773*$A_{w,5I}$-16.239 com $r^2_{5I,Aw}$=0.75, $r_{5I,Aw}$=0.84, p<0.01, N_{5I}=6. Os valores de 1.8≤t_{DW}≤2.4 atestaram a independência destas variáveis.

Quando relacionada a distorção $Ø_{BM,m}$ com os caudais fluviais, obtiveram-se regressões boas, positivas e estatisticamente significativas, para todas as estações do estuário, representadas em graus pelas equações expressas no gráfico da figura 5.3.5. 8.

As estações do canal principal do estuário descreveram para caudais do Mondego inferiores a $Q_{r,Mondego}$≤160m^3/s, distorções compreendidas entre os 10.8°≤$Ø_{BM,m,Emb}$≤52.9°, 12.3°≤$Ø_{BM,m,5I}$≤43.3° e os 11.2°≤$Ø_{BM,m,EE}$≤34.7°, que caracterizaram distorções médias de $\bar{Ø}_{BM,m,Emb}$≈33°, de $\bar{Ø}_{BM,m,5I}$≈30.8° e de $\bar{Ø}_{BM,m,EE}$≈23.6°. No braço sul, para os caudais do Pranto registados

($Q_{r,Gala} \leq 42 m^3/s$), obtiveram-se distorções compreendidas entre os $8.3 \leq Ø_{BM,m,Gala} \leq 19.9°$, que traduziram um valor médio de $\bar{Ø}_{BM,m,Gala} \approx 14.8°$.

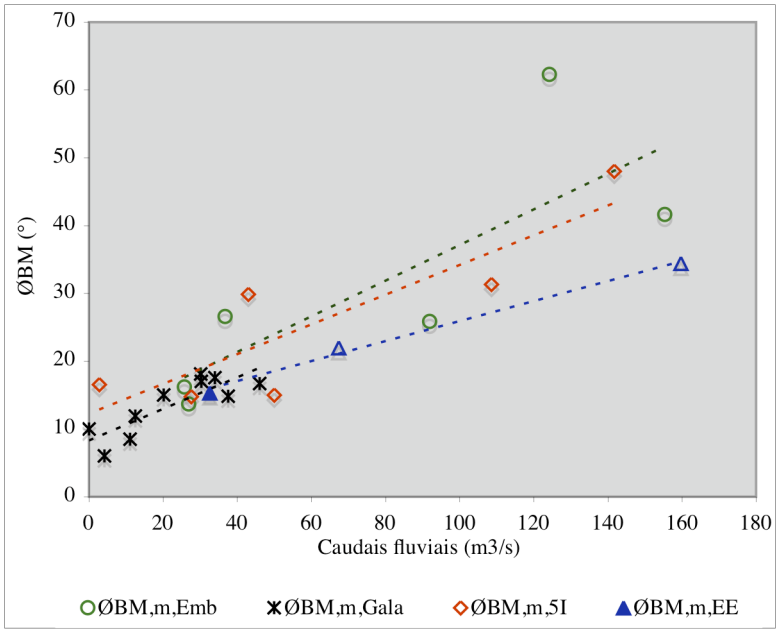


Figura 5.3.5. 8. Regressões obtidas entre a distorção sofrida pela maré na fase de menor altura da coluna de água ($Ø_{BM,m}$) e a variação dos caudais fluviais (Q_r), nas diferentes estações do estuário. A distorção $Ø_{BM,m}$ correspondeu ao atraso temporal ocorrido entre a estofa da baixa-mar dos escoamentos médios e a BM, tendo sido expresso em graus de acordo com Dyer (1997). As regressões foram descritas na Embocadura por $Ø_{BM,m,Emb,Qr \leq 155 m^3/s} = 0.2629 * Q_{r,Emb} - 10.849$ com $r^2_{Emb,Qr} = 0.64$, $r_{Emb,Qr} = 0.81$, $p < 0.05$, $N_{Emb} = 6$; na Gala por $Ø_{BM,m,Gala,Qr \leq 46 m^3/s} = 0.2323 * Q_{r,Gala} - 8.3109$ com $r^2_{Gala,Qr} = 0.71$, $r_{Gala,Qr} = 0.84$, $p < 0.05$, $N_{Gala} = 10$; nos Cinco Irmãos por $Ø_{BM,m,5I,Qr \leq 142 m^3/s} = 0.2192 * Q_{r,5I} - 12.266$ com $r^2_{5I,Qr} = 0.76$, $r_{5I,Qr} = 0.87$, $p < 0.05$, $N_{5I} = 6$ e na Est. Elevatória por $Ø_{BM,m,EE,Qr \leq 160 m^3/s} \approx 0.1473 * Q_{r,EE} - 11.174$ com $r^2_{EE,Qr} = 0.99$, $r_{EE,Qr} = 0.997$, $p < 0.05$, $N_{EE} = 3$. Os resultados de $1.8 \leq t_{DW} \leq 2.2$ atestaram a independência desta variáveis.

Desta forma, as distorções registadas na estação da Embocadura definiram as maiores magnitudes relativas de $Ø_{BM,m}$ entre as estações em estudo, que se relacionaram com a sua localização na parte distal do estuário, na confluência dos dois braço, recebendo nesta fase terminal da vazante os escoamentos distorcidos provenientes quer do braço norte, quer do braço sul. Entre as estações dos Cinco Irmãos e a Embocadura, registou-se um aumento médio da distorção $\bar{Ø}_{BM,m,x}$ da ordem dos 2.3° (ou de 0.08h), enquanto no braço sul, entre as estações da Gala e a Embocadura, verificou-se um aumento relativo de $\bar{Ø}_{BM,m,x}$ mais elevado, da ordem dos 5.1° (ou de 0.17h). Este maior atraso dos escoamentos do final da vazante no braço sul, foi igualmente corroborado com a observação de frentes durante as actividades de campo, representadas nas figura 5.3.1.14. Estas, traduziram uma obstrução dos escoamentos provenientes do braço sul durante o final da vazante,

por parte dos volumes de água de maior magnitude procedentes do braço norte, que por sua vez também escoaram pelo canal principal que se encontrava no seguimento longitudinal da embocadura e da foz do estuário, à semelhança do considerado por Blanton *et al* (2000) para o estuário do Mira.

As regressões simples obtidas na estação Embocadura apontaram para que 87% e 64% da variabilidade de $Ø_{BM,m,Emb}$ tenha sido explicada respectivamente por $A_{w,Emb}$ e por $Q_{r,Emb}$, pelo que sugeriram um domínio da variação da altura da maré na distorção dos escoamentos nesta fase de menor altura da coluna de água. Testado um modelo de regressão múltipla entre $Ø_{BM,Emb}$ com A_w e Q_r, verificou-se que este foi igualmente foi significativo e que passou a explicar 86% da variabilidade de $Ø_{BM,m,Emb}$, dado ter sido definido por $r^2_{Emb,Aw,Qr}=0.86$, $r_{Emb,Aw,Qr}=0.93$, $p<0.05$, $N_{Emb}=6$, de acordo com a expressão 5.3. 3.

$$Ø_{BM,m,Emb}=-11.626+0.019*Q_{r,Emb}+24.732*A_{w,Emb} \text{ (para } 0.9\leq A_{w,Emb}\leq 2.5\text{m e } Q_{r,Emb}\leq 155\text{m}^3\text{/s)} \qquad (5.3.\,3)$$

Na estação dos Cinco Irmãos, as duas regressões simples obtidas ($Ø_{BM,m,5I,Aw}$ e $Ø_{BM,m,5I,Qr\leq 142\text{m}^3\text{/s}}$) apontaram para que 75% da variabilidade de $Ø_{BM,5I}$ tenha sido igualmente explicada por $A_{w,5I}$ e $Q_{r,5I}$, pelo que, se considerou uma importância relativa similar por parte da maré e das descargas do Mondego, na distorção dos escoamentos desta fase. Testada uma regressão múltipla entre estas variáveis, nesta estação, verificou-se que foi significativa com $r^2_{5I,Aw,Qr}=0.83$, $r_{5I,Aw,Qr}=0.91$, $p<0.10$, $N_{5I}=6$, e definida por.

$$Ø_{BM,m,5I,Qr\leq 142\text{m}^3\text{/s}}=-4.25+14.16*A_{w,5I}+0.13*Q_{r,5I}$$

Na estação Elevatória, constatou-se que cerca de 99% da variabilidade de $Ø_{BM,m,EE}$ foi explicada por $Q_{r,EE}$, enquanto na estação da Gala, apenas os caudais do Pranto explicaram 71% da variabilidade de $Ø_{BM,m,Gala}$. Estes resultados levaram a considerar uma maior influência da maré na distorção $Ø_{BM,m}$ em detrimento dos caudais do fluviais para as estações do canal principal mais próximas da foz, e *vice versa*. Para o braço sul, muito embora só se tenha registado uma regressão positiva entre $Ø_{BM,m,Gala}$ com $Q_{r,Gala}$, a distorção associada à propagação da maré poderá ter sido

camuflada pela distorção imposta pelos extensos ambientes intermareais localizados nos sectores médio-proximal deste braço (figuras 5.2.1 e 5.2.2). As extensas zonas de sapal, terão sido responsáveis por uma elevada retenção de água durante as fases da vazante e consequentemente provocado um aumento dos atrasos das estofas da BM relativamente às baixa-mares, sob marés de maior amplitude.

Comparadas as distorções aferidas nestas duas fase diametralmente opostas, constatou-se que as magnitudes da distorção dos escoamentos na BM foram muito superiores às da PM, nas diferentes estações do estuário. Estas, resultaram de aumentos, quer por parte do atrito de fundo que terá sido mais elevado em resposta ao decréscimo relativo da altura da coluna de água[2], quer com o aumento relativo da distorção fluvial nesta fase, uma vez que, as descargas fluviais não terão tido volumes constantes ao longo de cada ciclo de maré[3].

Terá acrescido também o facto de nesta fase da maré, estas duas componentes intervenientes na distorção dos escoamentos, terem actuado em parceria, no sentido de conferir maiores atrasos às estofas da baixa-mar relativamente à BM, e consequentemente maiores distorções nesta fase da maré, com $|Ø_{BM}|>>|Ø_{PM}|$, quer sob marés de maior amplitude, quer sob maiores descargas fluviais. Realça-se que na fase da preia-mar, o atrito de fundo actuou no sentido de conferir maiores atrasos da estofa da PM relativamente à PM, enquanto a distorção fluvial actuou em sentido contrário, antecipando a estofa da PM relativamente à PM, e desta forma anulando-se os seus efeitos.

Definidas as componentes fluvial e do atrito de fundo intervenientes na distorção dos escoamentos nesta fase de menor altura da coluna de água, considerou-se que a propagação da onda de maré descreveu um comportamento combinado do tipo progressivo+estacionário+fluvial,

[2]. Nas quatro estações em estudo, as profundidades médias na PM e na BM rondaram os seguintes valores: $\bar{h}_{PM,Emb}\approx 7.5$, $\bar{h}_{BM,Emb}\approx 6.0$m; $\bar{h}_{PM,5I}\approx 4.2$, $\bar{h}_{BM,5I}\approx 2.7$m; $\bar{h}_{PM,EE}\approx 3.7$, $\bar{h}_{BM,EE}\approx 2.1$m e $\bar{h}_{PM,Gala}\approx 3.6$, $\bar{h}_{BM,Gala}\approx 2$m.

[3]. Que se relacionaram, quer com as diferentes interacções ocorridas entre a componente horizontal do gradiente de pressão geradas pela maré aquando das fases da enchente e da vazante, com as descargas fluviais, quer com a própria variabilidade temporal das descargas fluviais, uma vez que a abertura das comportas da Estação Elevatória do rio Foja e das comportas da Quinta do Canal, do rio Pranto, efectuaram-se apenas durante as fases de vazante e princípios da enchente.

definido por uma componente mais progressiva sob marés de maior amplitude, e/ou mais "fluvial" sob maiores descargas fluviais.

5.3.5.4. Variação da Distorção dos Escoamentos na Coluna de Água

Tendo por objectivo quantificar a importância relativa destas duas componentes intervenientes na distorção[4] dos escoamentos durante as fases da PM e da BM, para os diferentes sectores do estuário, passou-se a analisar neste item, a variação da distorção em diversos níveis distribuídos ao longo da coluna de água ($Ø_z$). Para tal, comparou-se a distorção média sofrida pelos escoamentos[5] ($Ø_m$), anteriormente descrita, com as distorções registadas nos escoamentos de fundo[6] ($Ø_b$) e nos escoamentos à superfície[7] ($Ø_s$), na PM e na BM, dado que estas fases integraram as distorções sofridas durante as enchente e vazantes, respectivamente. Desta forma, passou-se a descrever as magnitudes e as tendências de variação de $Ø_b$, de $Ø_m$ e de $Ø_s$ para cada estação do estuário, e relacioná-las com os agentes hidrodinâmicos em estudo e com os principais processos intervenientes na distorção dos escoamentos.

5.3.5.4.1. Estação da Embocadura

Para a estação localizada do sector distal do canal principal do estuário foram relacionadas as distorções registadas na coluna de água durante as fases da PM e da BM com a variação da magnitude dos principais mecanismos de transporte. Para estas fases da maré realçam-se os seguintes resultados.

Relações Obtidas na PM

Para a estação da embocadura, começou-se por relacionar a distorção sofrida na coluna de água durante a PM ($Ø_{PM,z,Emb}$) com a magnitude dos principais agentes hidrodinâmicos. Assim, quando confrontadas as magnitudes de $Ø_{PM,z,Emb}$ com as descargas fluviais ($Q_{r,Emb}$), obtiveram-se

[4]. O atrito de fundo e a distorção fluvial.
[5]. Obtida apartir da velocidade média integrada na coluna de água.
[6]. A distorção $Ø_b$ representou o atraso temporal ocorrido entre as velocidades junto ao fundo e a superfície livre, convertido em graus.
[7]. A distorção $Ø_s$ representou o lapso de tempo registado entre as estofas das velocidades de superfície e a superfície livre, convertido em graus.

para os diferentes níveis em análise, três regressões negativas, muito boas e significativas, representadas no gráfico da figura 5.3.5. 9.

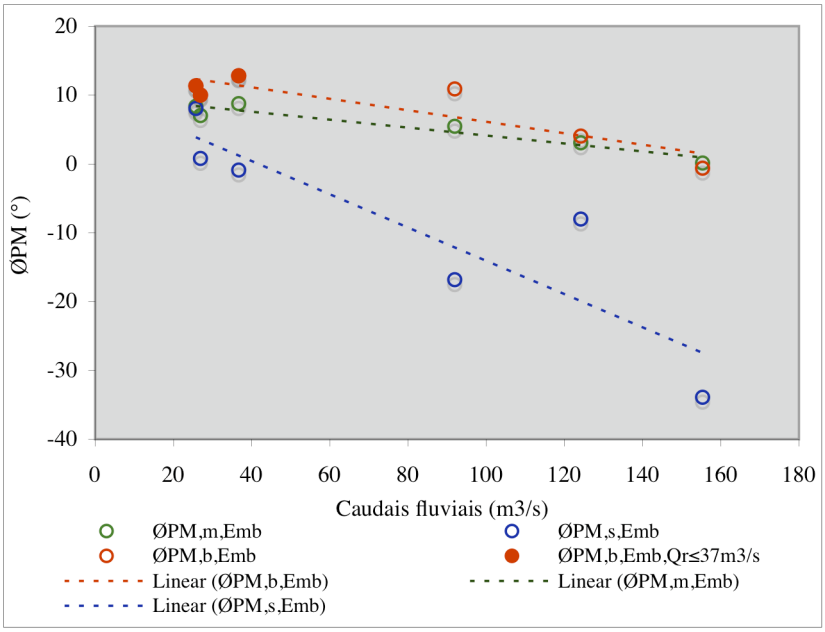


Figura 5.3.5. 9. Regressões obtidas entre a distorção dos escoamentos na coluna de água ($Ø_{PM,z,Emb}$) e a variação da magnitude das descargas fluviais (Q_r). Na legenda, $Ø_{PM,b,Emb}$, $Ø_{PM,m,Emb}$ e $Ø_{PM,s,Emb}$ representaram respectivamente as distorções expressas em graus sofridas pelos escoamentos junto ao fundo, pelos escoamentos médios e pelos escoamentos de superfície, na estação da Embocadura. As relações auferidas foram: $Ø_{PM,b,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.0836*$Q_{r,Emb}$+14.48 com $r^2_{b,Qr}$=0.79, $r_{b,Qr}$=-0.89, p<0.05, $N_{b,Emb}$=6 para os escoamentos de fundo; de $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.0579*$Q_{r,Emb}$+9.9022 com $r^2_{m,Qr}$=0.92, $r_{m,Qr}$=-0.96, p<0.05, $N_{m,Emb}$=6 para os escoamentos médios, e de $Ø_{PM,s,Emb,Qr\leq155m^3/s}$=-0.2428*$Q_{r,Emb}$+10.231 com $r^2_{s,Qr}$=0.79, $r_{s,Qr}$=-0.89, p<0.05, $N_{s,Emb}$=6 para os escoamentos de superfície.

Relacionadas as magnitudes de $Ø_{PM,z,Emb}$ com a variação da altura da maré, verificou-se que aquando de baixos regimes fluviais ($Q_r\leq37m^3/s$), junto ao fundo e nos escoamentos médios foram definidas regressões positivas, não significativas em resultado do número reduzido de ciclos de maré aferidos no campo sob estas condições hidrodinâmicas. Estas foram descritas pelas equações de $Ø_{PM,b,Emb,Qr\leq37m^3/s}$ e de $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m^3/s}$ representadas na figura 5.3.5. 10. Para caudais do Mondego mais elevados, compreendidos entre os $92\leq Q_r\leq155m^3/s$, passou-se a registar regressões negativas entre $Ø_{PM,z,Emb}$ com $A_{w,Emb}$, encontrando-se as distorções negativas mais elevadas associadas às maiores descargas fluviais. Para os escoamentos de superfície foram definidas regressões que descreveram tendências de variação positivas sob baixos caudais fluviais ($Q_r\leq37m^3/s$), e negativas sob descargas mais elevadas. Sob descargas fluviais inferiores a $Q_r\leq155m^3/s$ considerou-se uma

tendência da variação linear simples de $Ø_{PM,s,Emb,Qr\leq155m^3/s}$ com $A_{w,Emb}$ representada no gráfico da figura 5.3.5. 10.

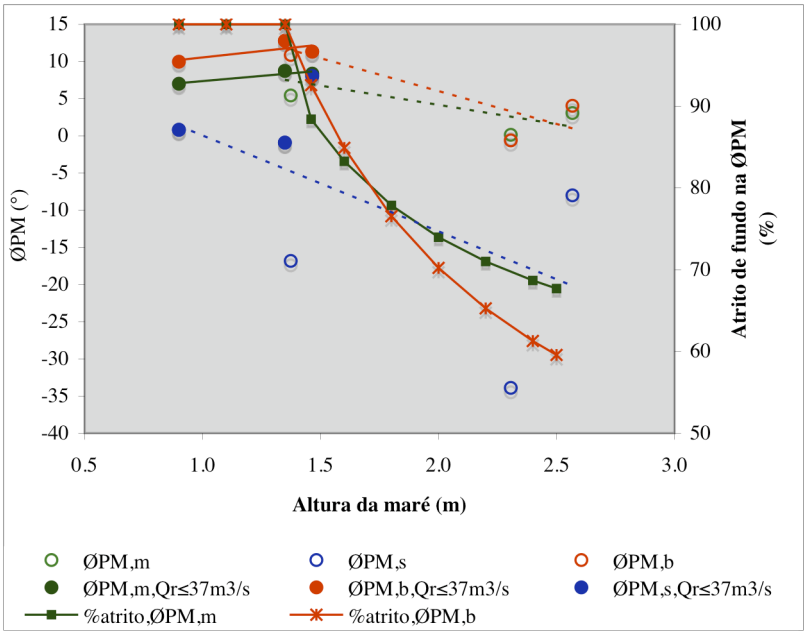


Figura 5.3.5. 10. Regressões obtidas entre a distorção dos escoamentos na coluna de água ($Ø_{PM,z,Emb}$) com a variação da altura da maré. Na legenda, $Ø_{PM,b,Emb}$, $Ø_{PM,m,Emb}$ e $Ø_{PM,s,Emb}$ representaram respectivamente as distorções sofridas pelos escoamentos junto ao fundo, pelos escoamentos médios e pelos escoamentos de superfície, na estação da Embocadura. $Ø_{PM,z,Qr\leq37m3/s}$ representou a distorção sofrida pelos escoamentos na PM considerando apenas os ciclos de maré sujeitos a caudais fluviais $Q_r\leq37m^3/s$. As relações auferidas foram descritas para os escoamentos de fundo por $Ø_{PM,b,Emb,Qr\leq37m^3/s}=3.4609*A_{w,Emb}+7.0801$ com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.54$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.73$, $N_{Emb}=3$; para os escoamentos médios por $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq37m^3/s}\approx2.7762*A_{w,Emb}+4.5939$ com $r^2_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.85$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.92$, $N_{Emb}=3$, e para os escoamentos de superfície por $Ø_{PM,s,Emb,Qr\leq155m^3/s}\approx-12.924*A_{w,Emb}+13.029$ com $r_{s,Aw}=-0.55$, $N_{s,Emb}=6$. Sob maiores descargas fluviais, definiu-se $Ø_{PM,b,Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}\approx-7.5*A_{w,Emb}+20.3$ com $r^2_{Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}=0.66$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.81$, $N_{Emb}=3$ e $Ø_{PM,m,Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}\approx-2.9*A_{w,Emb}+9.1$ com $r^2_{Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}=0.58$, $r_{Emb,Qr\leq37m^3/s}=0.77$, $N_{Emb}=3$. A segunda ordenada deste gráfico (Y_2) representou a percentagem que o atrito de fundo interveio na distorção dos escoamentos médios ($\%_{atrito,ØPM,m}$) e nos escoamentos de fundo ($\%_{atrito,ØPM,b}$), determinadas com recurso à expressão 5.3. 4.

Para marés de $0.9\leq A_{w,Emb}\leq2.5m$ e descargas fluviais inferiores a $Q_{r,Emb}\leq155m^3/s$, os resultados obtidos apontaram para amplitudes de variação da distorção dos escoamentos junto ao fundo compreendidas entre os $1.5°\leq Ø_{PM,b,Emb}\leq12.8°$, enquanto as distorções dos escoamentos médios foram caracterizadas por $0.9°\leq Ø_{PM,m,Emb}\leq8.7°$ e as distorções dos escoamentos de superfície foram de $-27.4°\leq Ø_{PM,s,Emb}\leq5.4°$. Estas variações de $Ø_{PM,z}$ definiram magnitudes médias de $\bar{Ø}_{PM,b,Emb}\approx7°$, de $\bar{Ø}_{PM,m,Emb}\approx4.7°$ e de $\bar{Ø}_{PM,s,Emb}\approx-11.6°$, respectivamente. Estes resultados também ilustraram que os maiores atrasos de tempo medidos entre a estofa da PM e a PM tiveram lugar junto ao fundo, tendo

desta forma descrito distorções[8] "positivas" de $Ø_{PM}$, de acordo com o modelo proposto por Dyer (1997).

Uma vez que as variações das distorções $Ø_{PM,b}$ apresentaram um comportamento directo e proporcional com A_w, sob baixos regimes fluviais, estas foram consentâneas com a acção do atrito de fundo, segundo o autor citado. Contudo, os maiores desfasamentos de tempo decorridos entre as duas componentes da maré nesta fase tiveram lugar na superfície dos escoamentos, mas de uma outra forma, tendo-se verificado que a estofa da PM tendeu a ocorrer mais cedo que PM e desta forma a representar distorções "negativas" de $Ø_{PM,s}$. Estas tendências de variação de $Ø_{PM,s,Emb}$ inversamente proporcionais a $A_{w,Emb}$ e a $Q_{r,Emb}$, foram consentâneas com a distorção imposta pelas descargas fluviais, pelo que se consideraram fundamentalmente relacionadas com a componente da distorção fluvial. Apurou-se igualmente que a importância relativa na distorção fluvial nos escoamentos terá decrescido na coluna de água em direcção ao fundo em consequência da competição ocorrida na PM entre a distorção fluvial e o atrito de fundo, tanto que, os coeficientes de determinação obtidos entre $Ø_{PM,z,Emb}$ com $A_{w,Emb}$ e com $Q_{r,Emb}$ definiram $r^2_{s,Aw}<r^2_{m,Aw}<r^2_{b,Aw}$ e $r^2_{s,Qr}>r^2_{m,Qr}>r^2_{b,Qr}$. Desta forma, as distorções registadas nos escoamentos médios nesta estação ($Ø_{PM,m,Emb}$) terão reflectido diferentes contribuições por parte do atrito de fundo e da distorção fluvial.

Tais considerações foram validadas com dados de campo que indicaram que nestas condições hidrodinâmicas a influência das descargas fluviais na PM apenas se fez sentir nos primeiros 1m a 1.5m da parte superficial dos escoamentos. Ali registaram-se os desfasamentos temporais acontecidos entre as estofas da PM com as PM e ocorreram os gradientes da salinidade mais significativos que foram apenas de $\partial S/\partial z_{PM,z,Emb} \approx 1‰$ a $\approx 2‰$. A restante massa de água foi caracterizada por ter apresentado salinidades constantes, com magnitudes da ordem dos $S_{PM,z,Emb} \approx 33‰$ ou $\approx 34‰$ e por ter apresentado estofas praticamente coincidentes com a PM (figuras

[8]. Os atrasos horários registados entre as estofas da PM e as PM, foram convertidos em graus.

5.3.8 e 5.3.13). O domínio da componente da distorção fluvial nos escoamentos de superfície foi igualmente corroborado com o registo nesta estação de frentes entre massas de água com densidades distintas (marinha e de mistura) aquando da PM, esquematizadas nas figuras 5.3.9 e 5.3.13.

Nas descargas fluviais elevadas (compreendidas entre os $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$), verificou-se que apesar da profundidade desta estação ter sido considerável (com $6.9 \leq \bar{h}_{PM,Emb} \leq 7.9 m$) a distorção fluvial ter-se-á feito sentir mesmo até aos escoamentos de fundo, uma vez que $Ø_{PM,b}$ passou a descrever tendências de variação negativas com $A_{w,Emb}$ e com $Q_{r,Emb}$, fundamentadas em coeficientes de determinação $r^2_{b,Qr} >> r^2_{b,Aw}$. Nestas condições, a análise dos perfis temporais da salinidade e da velocidade (figuras 5.3.2.2; 5.3.1.15; 5.3.1.19) revelaram que com o aumento das descargas fluviais a massa de água superficial deixou de representar 1.5m de espessura nesta fase, para definir cerca de 6m aquando de caudais de $Q_{r,Emb} \approx 155 m^3/s$ e passar a representar mais de 2/3 do escoamento. Esta camada passou a ser definida por um gradiente vertical da salinidade elevado, da ordem dos $\partial S/\partial z_{PM,Emb} \approx 4‰$ e por uma antecipação da estofa da PM relativamente à PM, contrastando com a camada de fundo que apresentava um gradiente pequeno ($\partial S/\partial z_{PM,b,Emb} \approx 1‰$) e com salinidades da ordem dos $S_{PM,b} \approx 32‰$.

Quando analisadas as diferenças ocorridas entre as magnitudes médias da distorção dos escoamentos médios e os de fundo, e as diferenças acontecidas entre os escoamentos de superfície e os médios, constatou-se que $(\bar{Ø}_{PM,m} - \bar{Ø}_{PM,b}) \approx 2.3°$ e $(\bar{Ø}_{PM,s} - \bar{Ø}_{PM,m}) \approx 16.3°$, pelo que se considerou que o aumento relativo registado na distorção ao ter sido mais elevado na parte superior dos escoamentos ter-se-á relacionado fundamentalmente com as descargas fluviais mais elevadas ($92 \leq Q_r \leq 155 m^3/s$), tanto que, que obteve $r^2_{s,Qr} = 0.79 >> r^2_{s,Aw} = 0.30$.

Relações Obtidas na BM

Na fase de menor altura da coluna de água, quando foram relacionadas as distorções $Ø_{BM,z,Emb}$ com a variação da magnitude das descargas fluviais medidas na estação da Embocadura, obtiveram-se regressões positivas e significativas para os três níveis batimétricos em análise, representadas pelas expressões do gráfico da figura 5.3.5. 11. A análise deste gráfico permitiu constatar que as distorções registadas nos diferentes níveis em análise foram mais elevadas à superfície e mais pequenas junto ao fundo. Uma vez que as magnitudes de $Ø_{BM,b,Emb}$ e de $Ø_{BM,m,Emb}$ foram muito semelhantes entre si, e muito mais pequenas às registadas em $Ø_{BM,s,Emb}$, levou a relacionar que este aumento relativo dos atrasos ocorridos entre a estofa da BM com BM na coluna de água por ter sido mais elevado na parte superficial dos escoamentos, esteve fundamentalmente relacionado com as descargas fluviais.

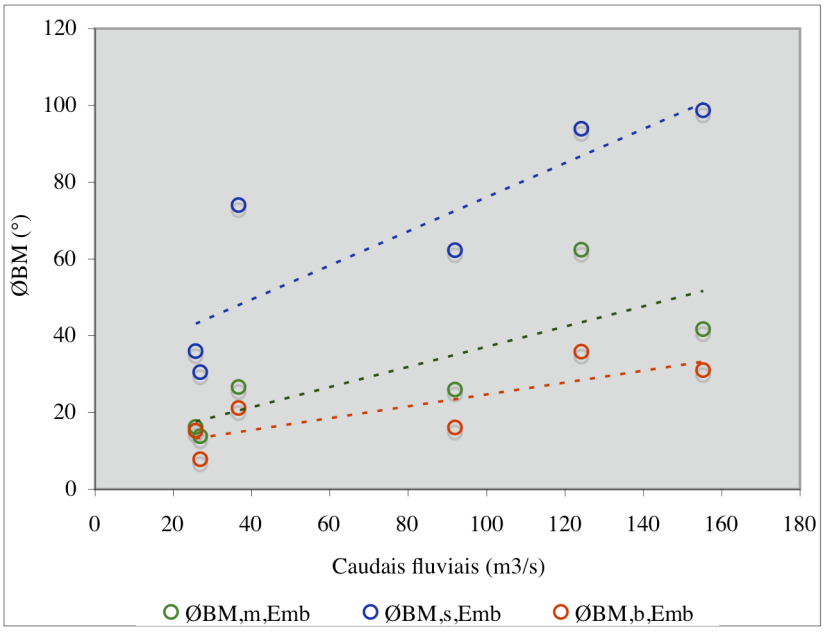


Figura 5.3.5. 11. Regressões obtidas entre a distorção dos escoamentos na coluna de água ($Ø_{BM,z,Emb}$) com a variação da altura da maré, na estação da Embocadura, durante a fase da baixa-mar. Na legenda, $Ø_{BM,b,Emb}$, $Ø_{BM,m,Emb}$ e $Ø_{BM,s,Emb}$ representaram respectivamente as distorções sofridas pelos escoamentos na BM junto ao fundo, nos escoamentos médios e à superfície. As regressões obtidas foram descritas por $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.1547*Q_{r,Emb}+9.2438$ com $r^2_{b,Qr}=0.66$, $r_{b,Qr}=0.81$, $p<0.05$, $N_{b,Emb}=6$; $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq155m3/s}=-0.2629*Q_{r,Emb}+10.849$ com $r^2_{m,Qr}=0.64$, $r_{m,Qr}=0.81$, $p<0.05$, $N_{m,Emb}=6$; $Ø_{BM,s,Emb,Qr\leq155m3/s}=0.4441*Q_{r,Emb}+31.722$ com $r^2_{s,Qr}=0.74$, $r_{s,Qr}=0.86$, $p<0.05$, $N_{s,Emb}=6$.

Na figura 5.3.5. 12 relacionam-se as distorções $Ø_{BM,z}$ registadas na coluna de água com as variações da altura da maré, na estação da Embocadura. O diagrama obtido permitiu identificar três

regressões positivas muito boas e significativas para os diferentes níveis em análise, encontrando-se estas expressas em graus. Estas definiram para marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.5$m e caudais inferiores a $Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, amplitudes de variação da distorção abrangidas entre os $9° \leq Ø_{BM,b,Emb} \leq 36.2°$, entre os $10.8° \leq Ø_{BM,m,Emb} \leq 56°$ e entre os $36.8° \leq Ø_{BM,s,Emb} \leq 100°$, a que corresponderam a distorções médias de $\bar{Ø}_{BM,b,Emb} \approx 23.1°$, de $\bar{Ø}_{BM,m,Emb} \approx 34.3°$ e de $\bar{Ø}_{BM,s,Emb} \approx 70.5°$, respectivamente para os escoamentos de fundo, médios e de superfície.

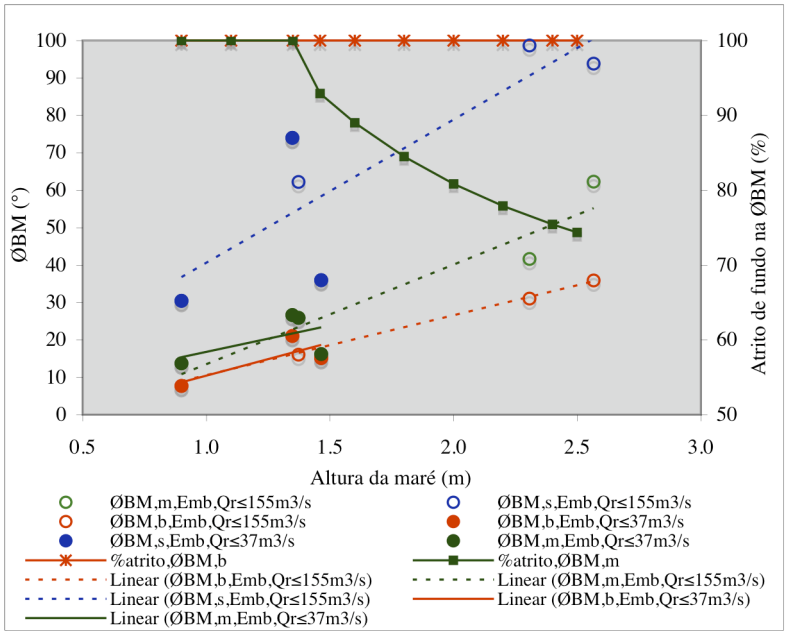


Figura 5.3.5. 12. Distorção sofrida pelos escoamentos em diferentes níveis da coluna de água ($Ø_{BM,z,Emb}$) e suas relações com a variação da altura da maré ($A_{w,Emb}$), na baixa-mar e na estação da Embocadura. A segunda ordenada do gráfico (Y_2) ilustra as percentagens relativas estimadas para a componente do atrito de fundo na distorção dos escoamentos, junto ao fundo ($\%_{atrito,ØPM,b}$) e nos escoamentos médios ($\%_{atrito,ØPM,m}$), calculadas de acordo com a expressão 5.3. 5. Na legenda, $Ø_{b,Qr\leq37m3/s}$ representou as distorções sofridas pelos escoamentos de fundo considerando apenas os ciclos de maré regidos por caudais fluviais inferiores a $Q_r \leq 37 m^3/s$. As regressões obtidas foram descritas por $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq155m3/s} = 16.008 * A_{w,Emb} - 5.4426$ com $r^2_{b,Aw} = 0.94$, $r_{b,Aw} = 0.97$, $p < 0.05$, $N_{b,Emb,Qr\leq155m3/s} = 6$; $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq37m3/s} = 17.787 * A_{w,Emb} - 7.3762$ com $r^2_{b,Aw} = 0.63$, $r_{b,Aw} = 0.79$, $N_{b,Emb,Qr\leq37m3/s} = 3$; $Ø_{BM,b,Emb,92\leq Qr\leq155m3/s} \approx 16.4 * A_{w,Emb} - 6.7$ com $r^2_{b,Aw} = 0.999$, $N_{b,Emb} = 3$; $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq155m3/s} = 26.589 * A_{w,Emb} - 13.089$ com $r^2_{m,Aw} = 0.87$, $r_{m,Aw} = 0.93$, $p < 0.05$, $N_{m,Emb} = 6$; $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq37m3/s} = 14.164 * A_{w,Emb} + 25.814$ com $r^2_{m,Aw} = 0.29$, $r_{m,Aw} = 0.54$, $N_{m,Emb} = 3$; $Ø_{BM,s,Emb,Qr\leq155m3/s} = 38.258 * A_{w,Emb} + 2.3378$ com $r^2_{s,Aw} = 0.73$, $r_{s,Aw} = 0.85$, $p < 0.05$, $N_{s,Emb} = 6$.

Os resultados obtidos, para além de terem definido distorções mais elevadas à superfície e mais pequenas junto ao fundo, também apontaram para que se tenha verificado um aumento relativo da distorção de $Ø_{BM,z}$ na coluna de água mais elevado na parte superior dos escoamentos, que se terá relacionado fundamentalmente com a distorção fluvial, dado que $(\bar{Ø}_{BM,m,Emb} - \bar{Ø}_{BM,b,Emb}) \approx 11.2°$ e

($\bar{Ø}_{BM,s,Emb}$ - $\bar{Ø}_{BM,m,Emb}$)≈36.2°. Realçaram igualmente tendências de aumento da distorção $Ø_{BM,z,Emb}$ directamente proporcionais à magnitude das descargas fluviais.

Comparadas as distorções da maré registadas junto ao fundo nesta fase, verificou-se que $Ø_{BM,b,Emb,Qr≤37m^3/s}$ e $Ø_{BM,b,Emb,92≤Qr≤155m^3/s}$ apresentaram tendências de variação com $A_{w,Emb}$ praticamente coincidentes. Nos escoamentos de superfície, constatou-se que as distorções $Ø_{BM,s,Emb,Qr≤155m^3/s}$ apresentaram magnitudes relativas muito superiores e também ostentaram uma tendência de variação com $A_{w,Emb}$ mais elevada que as anteriores. Estes aumentos, relacionaram-se especialmente com o facto de nesta estação as distorções medidas durante as marés vivas de maior amplitude terem também sido casualmente medidas sob as descargas de maior magnitude do Mondego, e consequentemente terem reflectido um incremento dos atrasos ocorridos entre as duas componentes da maré na BM na superfície dos escoamentos. Se se considerar que as distorções medidas junto ao fundo sob baixos regimes fluviais reflectiram fundamentalmente a acção do atrito, então estes resultados permitiram também conjecturar que nesta fase terminal da vazante, as distorções $Ø_{BM,b,Emb,Qr≤155m^3/s}$ e $Ø_{BM,s,Emb,Qr≤155m^3/s}$ terão reflectido fundamentalmente a acção do atrito e da distorção fluvial, respectivamente (figura 5.3.5. 12). A análise de dados de campo validaram estas considerações ao permitirem identificar duas massa de água com características físicas e comportamentos hidrodinâmicos distintos, aquando da BM nesta estação, recorrendo à observação dos diagramas das figuras 5.3.1.12 e 5.3.1.14.

A camada de fundo destes escoamentos foi definida por um espaçamento relativo das isohalinas mais elevado e tradutor de gradientes verticais da salinidade mais pequenos, da ordem dos $∂S/∂z_{BM,b,Emb}$≈2‰ a 3‰ para baixos regimes fluviais e da ordem dos $∂S/∂z_{BM,b,Emb}$≈5‰ a 6‰ para $92≤Q_{r,Emb}≤155m^3/s$, mas tendo por referencia salinidades de fundo elevadas e compreendidas entre os $28≤S_{BM,b,Emb}≤33$‰. Nesta camada, as estofas da BM tenderam a coincidir com as BM consideradas nos trabalhos de campo, ou então, a ocorrer pouco antes destas BM mas reflectindo sempre uma tendência para serem simultâneas com o aumento da distância ao fundo. A espessura

desta camada rondou os 3m a 4m e representou cerca de metade de todo o escoamento nesta fase de menor altura da coluna de água.

A transição para a camada superior dos escoamentos teve por base o facto de as estofas da BM passarem a ostentar atrasos progressivos e significativos relativamente às BM, bem como, por esta massa de água passar a apresentar gradientes de salinidade elevados. Esta camada de superfície apresentou gradientes verticais da salinidade sempre superiores a $\partial S/\partial z_{BM,Emb} \geq 17‰$ e chegou a exibir uma espessura de ≈4m para caudais do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb} \approx 124 m^3/s$.

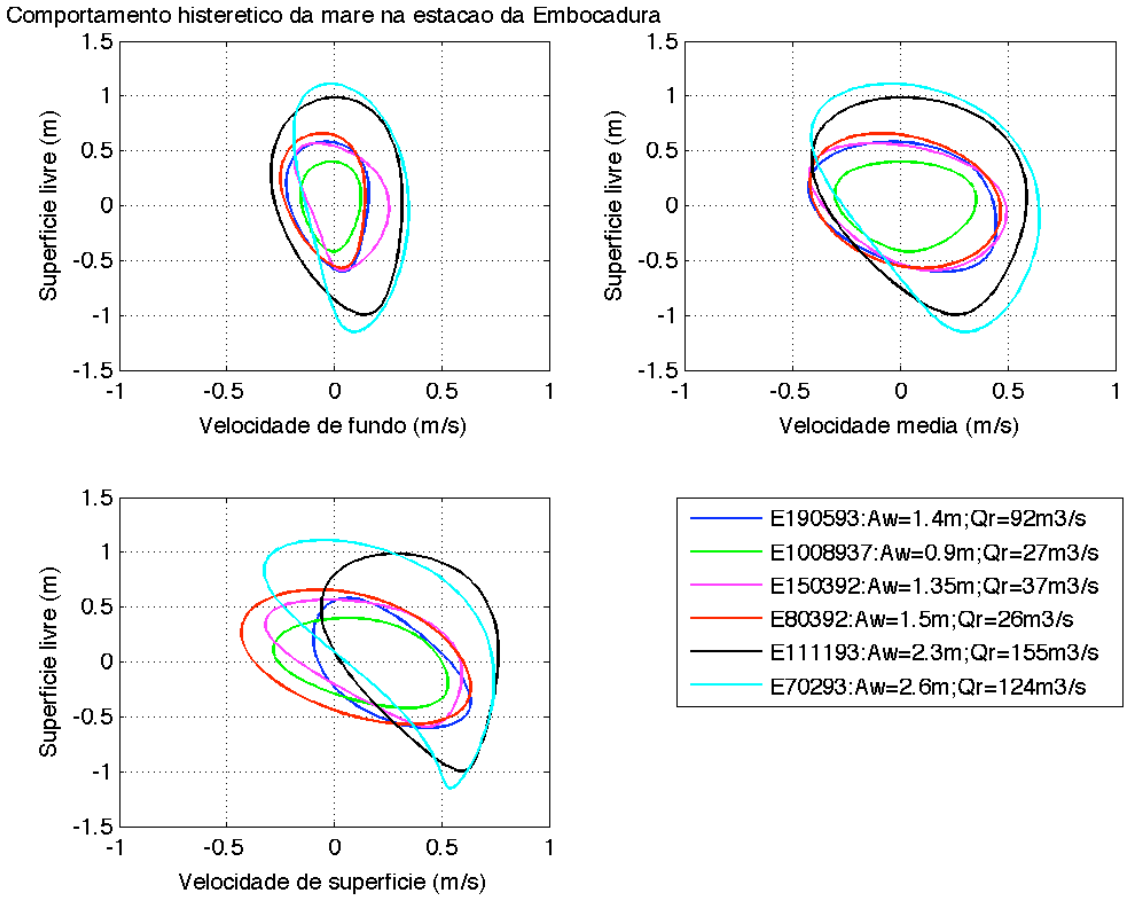


Figura 5.3.5. 13. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação da Embocadura.

Em termos hidrodinâmicos contrastou claramente com a camada de fundo, não só por ter apresentado atrasos elevados das estofas da BM relativamente às BM, mas também por estes terem sido mais elevados para níveis mais próximos da superfície. Este comportamento permitiu relacionar a distorção medida à superfície dos escoamentos $Ø_{BM,s,Emb,Qr \leq 155 m^3/s}$ como tendo sido

fundamentalmente regulada pelos caudais fluviais, enquanto a distorção da camada de fundo $Ø_{BM,b,Emb,Qr\leq155m^3/s}$ fundamentalmente relacionada com o atrito.

Quando comparadas as magnitudes das distorções registadas na PM e na BM desta estação, verificou-se ter havido um aumento considerável de $Ø_{Emb}$ para a fase de menor altura da coluna de água, que foi em média da ordem dos $\bar{Ø}_{PM,m,Emb}\approx5.3°$ para os $\bar{Ø}_{BM,m,Emb}\approx34.3°$. Este aumento relativo ter-se-á relacionado fundamentalmente quer com um efeito de amortecimento da distorção gerado na preia-mar em resultado do atrito de fundo e da distorção fluvial terem actuado em sentidos opostos, anulando-se mutuamente, quer por se ter verificado um aumento relativo do atrito de fundo para a BM, em resultado da maior interacção dos escoamentos com o fundo do canal face à menor altura da coluna de água, de acordo com Aubrey & Speer (1985), Friedrichs *et al* (1990). Também terá contribuído o facto de os caudais fluviais não terem tido uma magnitude regular ao longo de cada ciclo de maré estudado, dado que a abertura das comportas dos principais afluentes do Mondego na zona estuarina tiveram lugar apenas durante as fases da vazante e princípios da enchente, pelo que terá ocorrido um aumento relativo das descargas de Q_r na BM e consequentemente um incremento da distorção fluvial. Estes aspectos corroboraram igualmente as assimetrias registadas entre as magnitudes das distorções dos escoamentos de fundo e de superfície, que foram também mais elevadas na BM, à semelhança do considerado por Blanton *et al* (2002).

Modelo para Diferenciar o Tipo de Distorção

De acordo com o modelo propagação e distorção da onda de maré descrito em Dyer (1997) os sistemas estuarinos bem misturados quando apresentam distorções na $Ø_{PM,m}$ e na $Ø_{BM,m}$, estas encontram-se fundamentalmente relacionadas com a acção do atrito de fundo. Este modelo permitiu descrever para aquelas fases, comportamentos estacionários quando $Ø_m\approx0°$, progressivos quando $Ø_m\approx90°$ e atribuir um carácter combinado estacionário+progressivo para a propagação da maré aquando de valores compreendidos entre os $0<Ø_m<90°$. As distorções por ele consideradas,

fundamentam-se nos atrasos de tempo decorridos entre as velocidades médias (integradas na coluna de água) e a variação da superfície livre, não considerando a variabilidade de $Ø_z$ na coluna de água.

$$\%atrito_{ØPM,b}=(100*(Ø_{PM,b}-Ø_{PM,s}))/(Ø_{PM,b,Qr\leq 37m3/s}-Ø_{PM,s,Qr\leq 155m^3/s})$$

$$\%atrito_{ØPM,m}=(100*(Ø_{PM,m}-Ø_{PM,s}))/(Ø_{PM,m,Qr\leq 37m3/s}-Ø_{PM,s,Qr\leq 155m^3/s}) \quad (5.3.4)$$

A aplicação deste modelo à estação da Embocadura aquando de baixos caudais fluviais, permitiu considerar que as regressões obtidas entre $Ø_{PM,b,Qr\leq 37m^3/s}$ e $Ø_{BM,b,Qr\leq 37m^3/s}$ com A_w, terão reflectido fundamentalmente a acção do atrito de fundo, tanto que os regimes exibidos nestas fases foram do tipo bem misturado. Uma vez que aquelas regressões foram obtidas com base em distorções medidas apenas durante marés mortas, considerou-se que elas também apresentaram a mesma tendência de variação sob marés de maior amplitude. Na BM, as distorções fluvial e o atrito de fundo foram representadas pelas regressões definidas apartir de $Ø_{PM,s,Qr\leq 155m^3/s}$ e $Ø_{PM,b,Qr\leq 155m^3/s}$ com A_w, tendo estas possibilitado estimar a importância relativa (expressa sob a forma de uma percentagem) que o atrito apresentou na distorção dos escoamentos médios $Ø_{BM,m}$, tendo por base as respectivas distâncias relativas representadas pela seguinte expressão.

$$\%atrito_{ØBM,m}\approx(100*(Ø_{BM,s,Qr\leq 155m^3/s}-Ø_{BM,m}))/(Ø_{BM,s,Qr\leq 155m^3/s}-Ø_{BM,b,Qr\leq 155m^3/s}) \quad (5.3.5)$$

A aplicação destes modelos (equações 5.3. 4 e 5.3. 5) aos dados obtidos pelas funções matemáticas que descreveram as variações de $Ø_{m,Emb}$ para as diferentes condições hidrodinâmicas de $A_{w,Emb}$ e $Q_{r,Emb}$, para as fases da PM e da BM, permitiu estimar as contribuições relativas que a distorção fluvial e o atrito terão apresentado na distorção dos escoamentos. Os resultados assim obtidos para a fase de maior altura da coluna de água, apontaram para que as distorções dos escoamentos médios $Ø_{PM,m,Emb,Qr\leq 37m^3/s}$ medidas na estação da Embocadura aquando de baixos regimes fluviais tenham sido condicionadas pelo atrito de fundo, uma vez que se obtiveram contribuições relativas deste da ordem dos 100% (figura 5.3.5. 10). Contudo, com o aumento gradual das descargas fluviais, verificou-se ter havido um decréscimo relativo da contribuição do atrito na distorção dos escoamentos $Ø_{PM,m}$ em detrimento da distorção fluvial, passando a primeira para percentagens da ordem dos 68% e a segunda para os 32%, aquando por exemplo de descargas

da ordem dos $Q_{r,Emb}\approx155m^3/s$. Na BM, e á semelhança da fase anterior, os resultados obtidos apontaram para que o atrito de fundo tenha regulado a distorção dos escoamentos médios $Ø_{BM,m,Emb,Qr\leq37m^3/s}$ aquando de baixos regimes fluviais, com contribuições relativas da ordem dos 100% (figura 5.3.5. 12). Sob caudais fluviais mais elevados, estas passaram a descrever um decréscimo relativo da contribuição do atrito de fundo em detrimento da distorção fluvial, apontando para percentagens da ordem dos 74% e a segunda para os 26%, aquando de caudais do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}\approx155m^3/s$.

Para o leque de variação dos regimes fluviais estudados ($Q_r\leq155m^3/s$), verificou-se ter havido um domínio por parte do atrito de fundo na distorção dos escoamentos médios, que se terá fundamentalmente relacionado com a considerável altura da coluna de água nesta estação, bem como, com a sua localização no sector distal do estuário, local onde a hidrodinâmica encontra-se fortemente condicionada pela maré. Os resultados obtidos também apontaram para que aquando de descargas fluviais mais elevadas a importância relativa por parte do atrito de fundo na $Ø_{m,Emb,92\leq Qr\leq155m^3/s}$, tenha sido ligeiramente mais elevada na fase de menor altura da coluna de água (com $\%atrito_{ØPM,m,Qr=155m^3/s}\approx68\%$ e $\%atrito_{ØBM,m,Qr=155m^3/s}\approx74\%$), muito embora nesta fase quer o atrito de fundo quer a distorção fluvial tenham também reflectido aumentos relativos à distorção apresentada na PM, como se pode constatar pela comparação das figuras 5.3.5. 10 e 5.3.5. 12.

5.3.5.4.2. Estação da Gala

As distorções registadas na coluna de água durante as fases da PM e da BM na estação localizada do sector distal do braço sul foram relacionadas com a variação dos principais mecanismos de transporte. Para estas fases da maré foram obtidos os seguintes resultados.

Relações Obtidas na PM

Na estação do braço sul, quando relacionadas as distorções registadas nos três níveis batimétricos na PM ($Ø_{PM,z,Gala}$) com os principais mecanismos de transporte, verificou-se terem sido apenas definidas tendências de variação com a altura da maré. Foram obtidas correlações positivas,

significativas entre $Ø_{PM,z,Gala}$ com $A_{w,Gala}$ para os escoamentos de fundo, médios e de superfície, tendo estas sido expressas em graus de pelas expressões ilustradas no gráfico da figura 5.3.5. 14. O facto de não terem sido definidas quaisquer tendências de variação de $Ø_{PM,z,Gala}$ com $Q_{r,Gala}$ nesta fase, foi consentâneo com o registo de magnitudes de descargas fluviais provenientes do Pranto praticamente nulas, uma vez que a abertura das comportas da Quinta do Canal para o braço sul, apenas se efectuou durante as vazantes e princípios das fases da enchente.

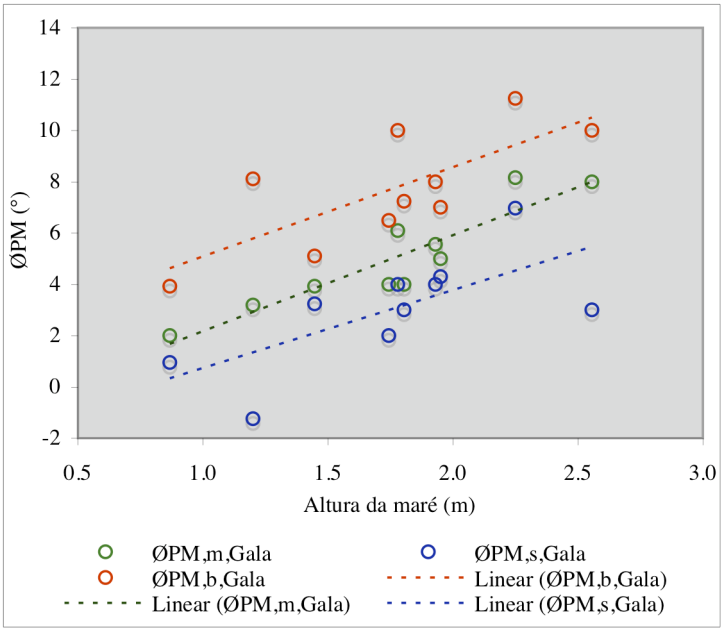


Figura 5.3.5. 14. Tendências de variação definidas entre as distorções registadas nos três níveis batimétricos em análise ($Ø_{PM,z,Gala}$) e a variação da altura da maré ($A_{w,Gala}$), na PM, na estação da Gala. Na legenda, $Ø_{PM,b,Gala}$, $Ø_{PM,m,Gala}$ e $Ø_{PM,s,Gala}$ representaram as distorções sofridas pelos escoamentos junto ao fundo, nos médios e à superfície, respectivamente. As regressões obtidas foram expressas em graus e descritas por $Ø_{PM,b,Gala}=3.4815*A_{w,Gala}+1.6092$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.56$, $r_{b,Aw}=0.75$, $p<0.05$, $N_{b,Gala}=10$ para os escoamentos de fundo; por $Ø_{PM,m,Gala}=3.7455*A_{w,Gala}-1.5737$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.84$, $r_{m,Aw}=0.92$, $p<0.01$, $N_{m,Gala}=10$ para os escoamentos médios e por $Ø_{PM,s,Gala}=3.0405*A_{w,Gala}+2.3089$ com $r^2_{Gala,Aw}=0.47$, $r_{s,Aw}=0.68$, $p<0.05$, $N_{s,Gala}=10$ para os escoamentos de superfície.

Para os quadros hidrodinâmicos representados durante os trabalhos de campo nesta estação, estas regressões definiram distorções compreendidas entre os $4.7°\leq Ø_{PM,b,Gala}\leq 10.3°$ para os escoamentos de fundo, entre os $1.8°\leq Ø_{PM,m,Gala}\leq 7.8°$ para os médios e entre os $0.4°\leq Ø_{PM,s,Gala}\leq 5.3°$ para os de superfície, as quais representaram magnitudes médias de $\bar{Ø}_{PM,b,Gala}\approx 7.5°$, de $\bar{Ø}_{PM,m,Gala}\approx 4.8°$ e de $\bar{Ø}_{PM,s,Gala}\approx 2.9°$, respectivamente. Estes resultados reflectiram que a distorção dos escoamentos aumentou da superfície para o fundo, tendo $Ø_{PM,b}$, $Ø_{PM,m}$ e $Ø_{PM,s}$ apresentado

variações muito similares entre si traduzidas por tendências de variação de $Ø_{PM,z,Gala}$ em função de A_w com pendores muito semelhantes entre si (figura 5.3.5. 14). Revelaram também que na PM, os maiores atrasos ocorridos da estofa da PM tiveram lugar junto ao fundo e os menores na superfície dos escoamentos. Este comportamento quando relacionado com o registo de diferenças médias de magnitudes de $Ø_{PM,z,Gala}$ muito semelhantes entre os níveis batimétricos em análise, definidos por $(\bar{Ø}_{PM,m} - \bar{Ø}_{PM,b}) \approx 2.7°$ e $(\bar{Ø}_{PM,s} - \bar{Ø}_{PM,m}) \approx 1.9°$, traduziu um decréscimo relativo gradual da distorção dos escoamentos do fundo para os de superfície, que terá reflectido a acção do atrito de fundo na coluna de água.

A análise fisiográfica do troço distal do braço sul também revelou ter sido concordante com este resultado, uma vez que foi definida por um canal regularizado, longitudinalmente caracterizado por uma secção transversal do tipo trapezoidal de largura constante de ≈190m, mas representado por um decréscimo gradual da sua batimetria para montante, que segundo Tonda (1990) e Blanton *et al* (2002) terá sido condizente com um domínio do atrito de fundo na distorção dos escoamentos durante a fases da enchentes.

As regressões positivas e estatisticamente significativas definidas entre $Ø_{PM,z,Gala}$ com $A_{w,Gala}$ permitiram estimar a distorção sofrida pelos escoamentos na PM nos três níveis da coluna de água nesta estação, bem como, relacioná-la com a distorção induzida pelo atrito de fundo.

Relações Obtidas na BM

Na fase da menor altura da coluna de água foram definidas tendências de variação da distorção $Ø_{BM,z,Gala}$ apenas com os caudais do Pranto, de acordo com o gráfico da figura 5.3.5. 15. Neste, encontram-se representadas para os escoamentos de fundo, médios e de superfície correlações positivas e estatisticamente significativas que permitem estimar a distorção sofrida pelos escoamentos na BM nesta estação em função de $Q_{r,Gala}$. Para os regimes do rio Pranto analisados ($Q_{r,Gala} \leq 42 m^3/s$), permitiram definir distorções compreendidas entre os $8.2° \leq Ø_{BM,b,Gala} \leq 13.5°$ para os escoamentos de fundo, entre os $8.3° \leq Ø_{BM,m,Gala} \leq 17.6°$ para os médios e

entre os $9.8° \leq Ø_{BM,s,Gala} \leq 21.7°$ para os escoamentos de superfície, tendo estes correspondido a distorções médias da ordem dos $\bar{Ø}_{BM,b,Gala} \approx 10.9°$, dos $\bar{Ø}_{BM,m,Gala} \approx 13°$ e dos $\bar{Ø}_{BM,s,Gala} \approx 15.8°$, respectivamente.

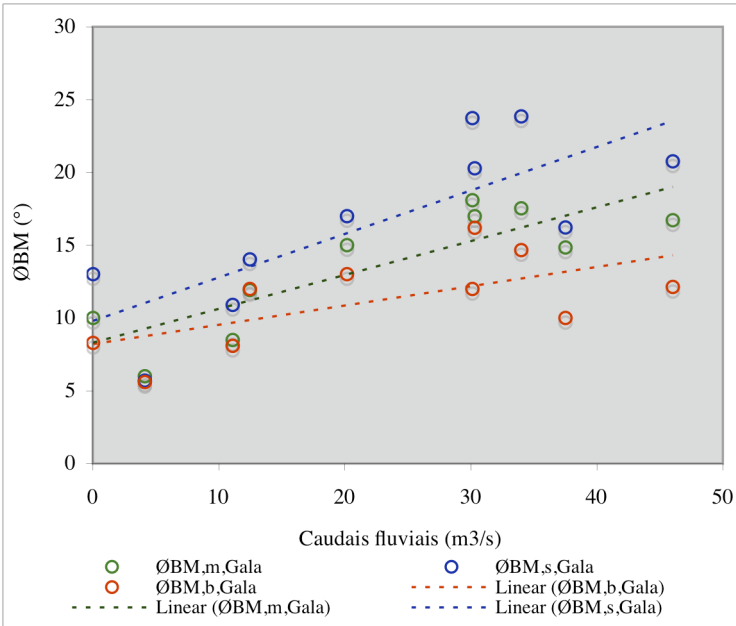


Figura 5.3.5. 15. Distorções sofridas pelos escoamentos nos vários níveis da coluna de água, na baixa-mar ($Ø_{BM,z,Gala}$), na estação da Gala. Tendências de variação de $Ø_{BM,z,Gala}$ com $Q_{r,Gala}$. Na legenda $Ø_{BM,b,Gala}$, $Ø_{BM,m,Gala}$ e $Ø_{BM,s,Gala}$ representaram as distorções sofridas pelos escoamentos de fundo, médios e de superfície, expressas em graus. As regressões obtidas foram descritas nos escoamentos de fundo por $Ø_{BM,b,Gala}=0.1328*Q_{r,Gala}+8.1961$ com $r^2_{s,Qr}=0.40$, $r_{b,Qr}=0.63$, $p<0.05$, $N_{b,Gala}=10$, nos escoamentos médios por $Ø_{BM,m,Gala}=0.2323*Q_{r,Gala}-8.3109$ com $r^2_{s,Qr}=0.71$, $r_m=0.84$, $p<0.05$, $N_{m,Qr}=10$, enquanto nos escoamentos de superfície por $Ø_{BM,s,Gala}=0.2985*Q_{r,Gala}+9.802$ com $r^2_{s,Qr}=0.62$, $r_{s,Qr}=0.78$, $p<0.05$, $N_{s,Gala}=10$.

Os resultados obtidos também traduziram um aumento da distorção do fundo para a superfície dos escoamentos, com desfasamentos médios intercalares da ordem dos 2.3° entre ($\bar{Ø}_{PM,m} - \bar{Ø}_{PM,b}$) e dos 2.8° entre ($\bar{Ø}_{PM,s} - \bar{Ø}_{PM,m}$), os quais revelaram que este aumento relativo de $Ø_{BM,z,Gala}$ foi mais elevado na parte superior dos escoamentos. Este, presumiu-se ter sido relacionado principalmente com a distorção fluvial, uma vez que cerca de 62% da variabilidade de $Ø_{BM,s,Gala}$ foi explicada por $Q_{r,Gala}$. A restante variabilidade de $Ø_{BM,s,Gala}$ ter-se-á relacionado com a distorção induzida pela complexa fisiografia do troço de canal localizado a montante desta estação, bem como, com o atrito de fundo. A contribuição da componente da distorção fluvial na distorção dos escoamentos nesta fase da maré, à semelhança do registado na estação anterior, terá sofrido um

decréscimo para o fundo, tanto que $Q_{r,Gala}$ passou a descrever apenas 40% da variabilidade de $Ø_{BM,b,Gala}$.

Relativamente à componente do atrito de fundo, pelo facto de não se terem definido tendências de variação entre $Ø_{BM,z}$ com $A_{w,Gala}$, tornou inviável a aplicação do modelo anterior usado para a quantificação da sua importância relativa. A ausência daquelas regressões poderá ter estado relacionado com as baixas profundidades médias apresentadas por esta estação na BM (com $\bar{h}_{BM,Gala}$=2.0m), bem como, com a aceleração que a componente horizontal da maré poderá ter sofrido em resultado do efeito de convergência gerado nos escoamentos de vazante, em consequência do afunilamento do canal ocorrido na transição do sector médio para o distal do braço sul (figura 5.2.1). Este efeito deverá ter sido responsável por uma alteração da relação variação da superfície livre/velocidade da corrente, nesta fase terminal da vazante.

A componente da distorção relacionada com a fisiografia, muito embora de difícil parametrização, pode ser associada às vastas zonas de sapal e ambientes intermareais localizados nos sectores médio-proximal do braço sul. Estes, terão sido responsáveis por uma considerável retenção de água durante as fases da vazante e consequentemente pelo incremento dos atrasos das estofas da BM relativamente às baixa-mares e aumento da distorção de $Ø_{BM,z,Gala}$, à semelhança do considerado por Blanton *et al* (2002).

Relacionadas as magnitudes de $Ø_{z,Gala}$ obtidas nestas duas fases diametralmente opostas da maré sob as condições de $0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.5$m e de $Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$, verificou-se que as distorções foram mais elevadas na BM. Nos escoamentos de fundo, uma vez que as magnitudes de $Ø_{BM,b,Gala}$ foram pouco superiores às de $Ø_{PM,b,Gala}$ (em média com $\bar{Ø}_{BM,b,Gala} - \bar{Ø}_{PM,b,Gala} \approx 3.3°$), e considerando que as segundas estiveram fundamentalmente relacionadas como atrito de fundo, assumiu-se que $Ø_{BM,z,Gala}$ também terá reflectido principalmente a distorção resultante da interacção dos escoamentos com o fundo deste canal, nesta fase de menor altura da coluna de água. As distorções dos escoamentos médios e de superfície apresentaram magnitudes relativas muito mais elevadas na BM, com

$\bar{\emptyset}_{BM,Gala} - \bar{\emptyset}_{PM,Gala} \approx 8.2°$ e $\bar{\emptyset}_{BM,s,Gala} - \bar{\emptyset}_{BM,s,Gala} \approx 12.9°$, tendo estas sido associadas sobretudo ao aumento da magnitude dos caudais do Pranto para esta fase, bem como, ao incremento dos atrasos das estofas das BM em resultado da retenção de água nos ambientes intermareais localizados a montante desta estação.

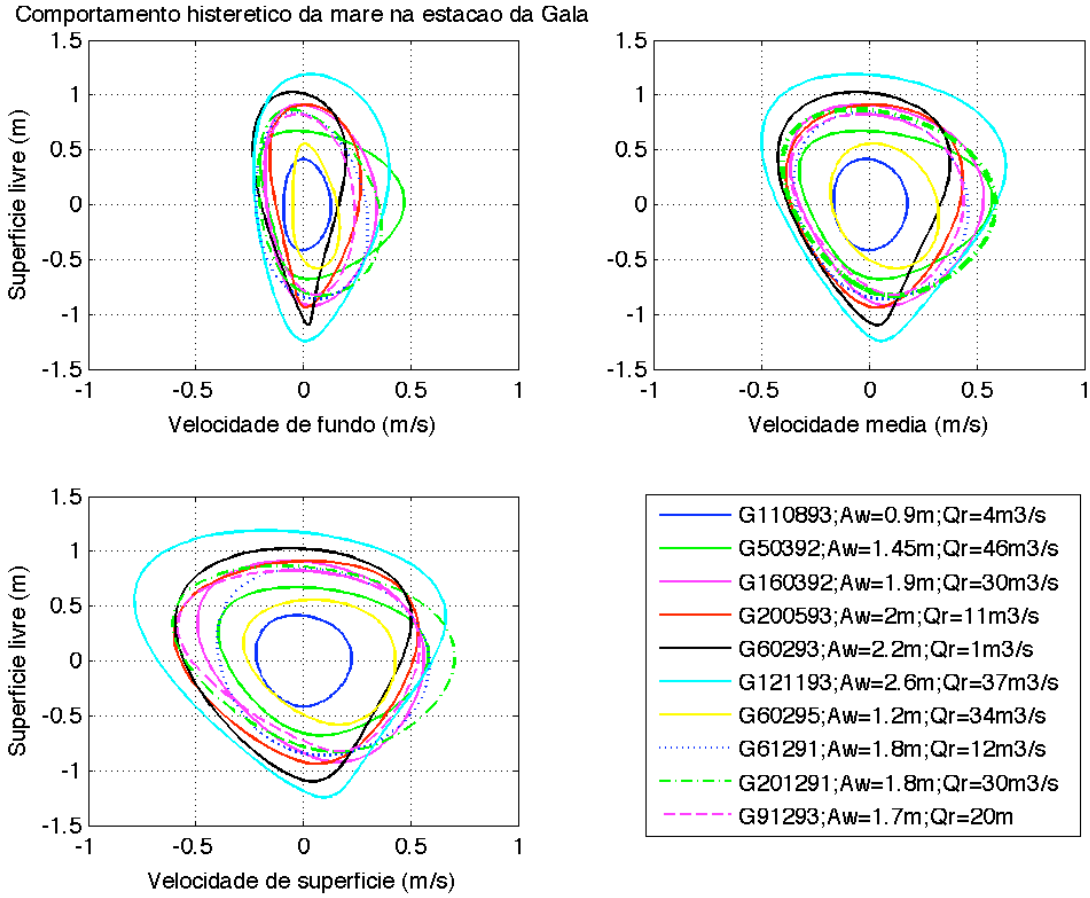


Figura 5.3.5. 16. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação da Gala.

Quando comparados os resultados obtidos nas duas estações do sector distal do estuário sob condições hidrodinâmicas similares, de $0.9 \leq A_w \leq 2.5$m e baixos regimes fluviais, verificou-se que as distorções da Embocadura apresentaram sempre magnitudes superiores às da Gala quer durante a PM, quer na BM. As distorções dos escoamentos médios foram mais pequenas na estação Gala com diferenças médias da ordem dos $\bar{\emptyset}_{PM,m,Emb} - \bar{\emptyset}_{PM,m,Gala} \approx 4.6°$ (ou 49% mais pequenas) para as preia-mares, e dos $\bar{\emptyset}_{BM,m,Emb} - \bar{\emptyset}_{BM,m,Gala} \approx 21.4°$ (ou 62%) para as baixa-mares. Traduziram desta forma perdas de energia por parte da onda de maré mais elevadas na estação do sector distal do canal

principal do estuário, relacionadas com uma maior interacção dos escoamentos com o fundo deste canal e consequentemente com um maior amortecimento dos mesmos. Este comportamento ter-se-á relacionado fundamentalmente com a localização desta estação quer no seguimento, quer na maior proximidade longitudinal à foz do estuário, como também, por ter sido sujeita a um maior hidrodinamismo. Estes resultados traduziram igualmente forças de atrito de menor magnitude actuantes na estação do sector distal do braço sul, relacionadas sobretudo com o menor hidrodinamismo deste braço periférico do estuário, muito embora as menores profundidades exibidas. Reflectiram também que na Embocadura e na Gala o abrandamento dos escoamentos (ou o atrito de fundo) foi superior nas fases de menor altura da coluna de água.

Uma vez confrontadas as distorções aferidas nestas estações mas sob descargas do Mondego mais elevadas (com $Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$ e sob $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$), verificou-se que na PM, a Embocadura passou a apresentar distorções relativas mais baixas que as da Gala com diferenças que atingiram os $Ø_{PM,m,Gala} - Ø_{PM,m,Emb} \approx 6.5°$ (ou 80%) aquando das descargas fluviais máximas registadas. Na BM, as distorções determinadas na Embocadura ostentaram magnitudes superiores às da Gala com diferenças médias que rondaram os $\bar{Ø}_{BM,m,Emb} - \bar{Ø}_{BM,m,Gala} \approx 20.9º$ (ou 61%). As magnitudes da distorção dos escoamentos médios na Embocadura, para além da componente do atrito de fundo, reflectiram também a contribuição da distorção fluvial, que competiu com a primeira nas fases da PM, e adicionou-se ao atrito nas BM. As diferentes importâncias relativas apresentadas pela componente da distorção fluvial nos dois braços do estuário ter-se-ão relacionado fundamentalmente com a diferença de magnitudes e com a drenagem diferenciada dos caudais do Mondego e os do Pranto.

5.3.5.4.3. Estação dos Cinco Irmãos

As distorções registadas ao longo da coluna de água nas fases da PM e na BM na estação localizada do sector médio do canal principal do estuário foram relacionadas com a variação dos

principais mecanismos de transporte. Para as duas fases da maré em analise foram apresentados e discutidos os seguintes resultados.

Relações Obtidas na PM

Relacionadas as distorções obtidas para os diferentes níveis da coluna de água na preia-mar ($Q_{PM,z,5I}$) quer com a variação da altura da maré, quer com os caudais fluviais, constatou-se que se obtiveram regressões não significativas positivas para os escoamentos de fundo e negativas para os médios e de superfície. No gráfico da figura 5.3.5. 17, ilustram-se apenas as tendências de variação obtidas de $Q_{PM,z,5I}$ com $A_{w,5I}$ para os diferentes níveis batimétricos em análise.

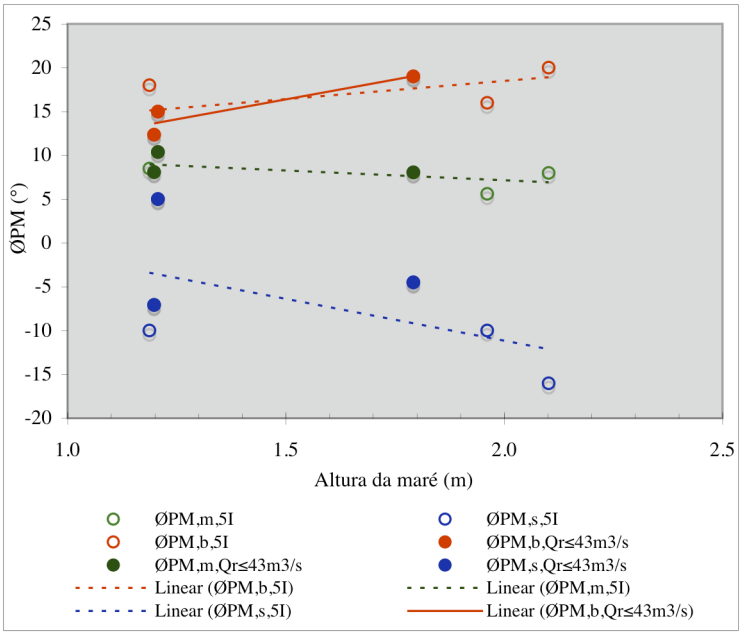


Figura 5.3.5. 17. Relações obtidas entre as distorções registadas nos diferentes níveis batimétricos ($Ø_{PM,z,5I}$) e a variação da altura da maré, para a fase da PM na estação dos Cinco Irmãos. Para os escoamentos de fundo obtiveram-se distorções expressas em graus por intermédio de $Ø_{PM,b,5I,Qr\leq142m^3/s}=4.1408*A_{w,5I}+10.21$ com $r^2_{5I,Aw}=0.38$, $r_{b,Aw}=0.62$, $N_{b,5I}=6$. Para os escoamentos médios obtiveram-se $Ø_{PM,m,5I,Qr\leq142m^3/s}=-2.2433*A_{w,5I}+11.638$ com $r^2_{5I,Aw}=0.39$, $r_{5I,Aw}=-0.62$, $N_{5I}=6$ e $Ø_{PM,b,5I,Qr\leq43m^3/s}=9.1174*A_{w,5I}+2.7042$ com $r^2_{5I,Aw}=0.85$, $r_{b,Aw}=0.92$, $N_{b,5I}=3$. Para os escoamentos de superfície obteve-se $Ø_{PM,s,5I,Qr\leq142m^3/s}=-9.5345*A_{w,5I}+7.9163$ com $r^2_{5I,Aw}=0.33$, $r_{s,Aw}=-0.57$, $N_{s,5I}=6$.

Sob condições hidrodinâmicas de $0.9\leq A_{w,5I}\leq2.5$m e caudais do Mondego $Q_{r,5I}\leq142m^3/s$, os resultados obtidos nesta estação permitiram estimar para os escoamentos de fundo e para os médios distorções compreendidas entre os $13.9°\leq Ø_{PM,b,5I}\leq20.6°$ e os $6.0°\leq Ø_{PM,m,5I}\leq9.6°$, tendo estas definido magnitudes médias de $\bar{Ø}_{PM,b,5I}\approx17.2°$ e $\bar{Ø}_{PM,m,5I}\approx7.8°$, respectivamente. Parar os escoamentos de superfície as magnitudes das distorções apresentadas foram negativas e variaram entre os |-

$2.6°|\leq Ø_{PM,s,5I} \leq |-12.1°|$, definindo uma distorção média da ordem dos $\bar{Ø}_{PM,s,5I} \approx -6.9°$. Nesta fase da maré, as distorções caracterizadas por atrasos da estofa da PM relativamente à PM mais elevadas tiveram lugar junto ao fundo e as de menor magnitude à superfície. Contudo, as distorções dos escoamentos medidas nesta estação que reflectiram a antecipação das estofas da PM relativamente à PM tiveram a sua expressão máxima na superfície dos escoamentos. Sob baixos regimes do Mondego ($Q_{r,5I} \leq 43 m^3/s$) as distorções obtidas nos escoamentos de fundo foram ligeiramente superiores, tendo sido estimadas entre os $10.9° \leq Ø_{PM,b,5I,Qr\leq 43m3/s} \leq 25.5°$ e definido um valor médio da ordem dos $\bar{Ø}_{PM,b,5I,Qr\leq 43m3/s} \approx 18.2°$.

A análise da variação da distorção na coluna de água permitiu constatar um aumento relativo de $Ø_{PM,z,5I}$, que foi mais elevado na parte superior dos escoamento, fundamentado nas diferenças relativas registadas entre $\bar{Ø}_{PM,b,5I} - \bar{Ø}_{PM,m,5I} \approx 9.4°$ e $\bar{Ø}_{PM,m,5I} - \bar{Ø}_{PM,s,5I} \approx 16.1°$. Este, terá estado relacionado fundamentalmente com a distorção fluvial, tanto que, as distorções negativas de $Ø_{PM,s,5I}$ foram consentâneas nesta fase com o efeito deformativo causado nos escoamentos por parte dos caudais do Mondego, bem como, a análise dos coeficientes de determinação obtidos, apontou para que variabilidade de $Ø_{PM,s,Emb}$ tenha sido explicada em 56% por $Q_{r,5I}$ e em apenas 33% por $A_{w,5I}$.

O comportamento da distorção dos escoamentos de fundo ao ter reflectido um aumento dos atrasos da estofa da PM relativamente à PM sob marés de maior amplitude, apontou para uma representação da distorção pelo atrito de fundo. As distorções $Ø_{PM,b,5I}$ medidas sob as descargas do Mondego mais elevadas, com $Q_{r,5I} \approx 109 m^3/s$ e $Q_{r,5I} \approx 142 m^3/s$, terão também reflectido a componente da distorção fluvial que se terá feito sentir nestes quadros em toda a coluna de água, com $\bar{h}_{PM,5I} \approx 4.2m$ nesta fase da maré. Esta pressuposição fundamentou-se na análise das distorções dos escoamentos de fundo sujeitas a baixos regimes do Mondego com $Q_{r,5I} \leq 43 m^3/s$, que passou-se a descrever uma regressão igualmente positiva, quase significativa entre $Ø_{PM,b,Qr\leq 43m3/s}$ com $A_{w,5I}$, representada na figura 5.3.5. 17.

Na superfície dos escoamentos, o registo das tendências de variação negativas entre $Ø_{PM,s,5I}$ com $A_{w,5I}$ e com $Q_{r,5I}$, conciliadas com magnitudes "negativas" de $Ø_{PM,s,5I}$, traduziram a ocorrência de estofas da PM que tiveram lugar antes da PM, e que aconteceram tendencialmente mais cedo sob marés sujeitas a descargas do Mondego de maior magnitude. Estas distorções $Ø_{PM,s,5I}$ à semelhança do considerado na estação da Embocadura, foram relacionadas fundamentalmente com a distorção fluvial. Esta relação foi igualmente corroborada com a identificação de uma massa de água menos densa na parte superficial dos escoamentos, tendo por base a análise dos diagramas de variação da salinidade destas séries de dados.

Nesta fase, o registo de tendências de variação negativas entre $Ø_{PM,m,5I}$ com os principais agentes dinâmicos, foram consentâneas com um supremacia da distorção fluvial, dado que esta componente foi responsável pelo incremento da antecipação da estofa da PM relativamente à PM sob maiores descargas do Mondego. Considerando que nesta fase da maré, as principais componentes intervenientes na distorção dos escoamentos competiram entre si, levou a considerar que a leitura de distorções de $Ø_{PM,m,5I}$ com magnitudes positivas reflectiram também uma componente da distorção imposta pelo atrito de fundo, só que não foi possível a sua estimação.

Comparados estes resultados com os obtidos na estação da Embocadura constatou-se que a distorção dos escoamentos de fundo tendeu a aumentar para montante, em média de $\overline{Ø}_{PM,b,Emb} \approx 13.1°$ para $\overline{Ø}_{PM,b,5I} \approx 18.2°$, tendo desta forma reflectindo um incremento do atrito de fundo ao longo do braço norte. Este aumento ter-se-á relacionado com uma maior interacção dos escoamentos de enchente com a fisiografia do fundo do canal do braço norte, principalmente nos sectores médio-proximais onde se localizam extensas barras intermareais longitudinais e algumas zonas de sapal e planícies de inundação.

Relações Obtidas na BM

Na fase oposta da maré, constatou-se que a variação da distorção ao longo da coluna de água ($Ø_{BM,z,5I}$) descreveu correlações muito boas com os principais agentes dinâmicos em análise.

Quando relacionada com a variação da magnitude das descargas do Mondego, obtiveram-se regressões positivas estatisticamente significativas para os três níveis batimétricos em estudo, encontrando-se estas expressas no gráfico da figura 5.3.5. 18. Uma vez relacionada a distorção $Ø_{BM,z,5I}$ com a variação da altura da maré nos Cinco Irmãos, definiram-se igualmente tendências de variação positivas, fundamentadas em regressões apenas significativas para os escoamentos médios e de fundo.

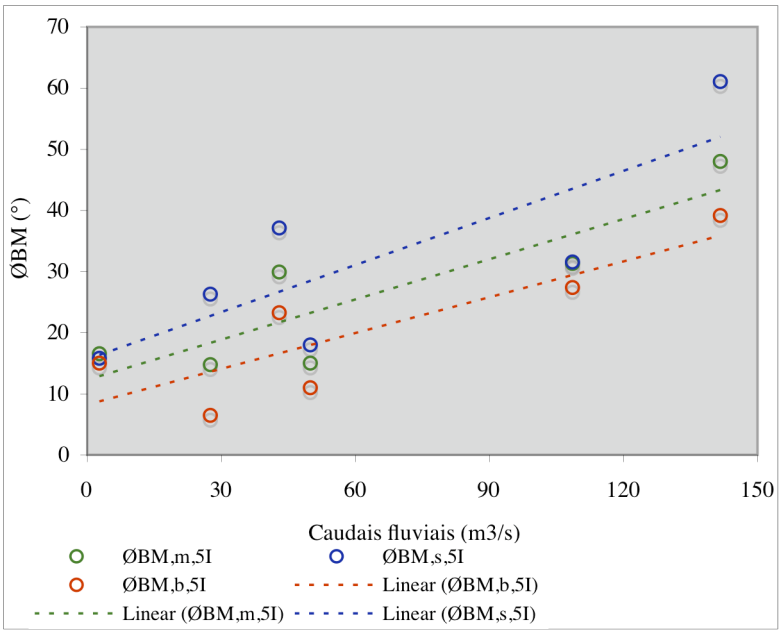


Figura 5.3.5. 18. Regressões obtidas entre as distorções registadas nos diferentes níveis batimétricos ($Ø_{BM,z,5I}$) e a variação das descargas do Mondego, para a fase da BM na estação dos Cinco Irmãos. Para os escoamentos de fundo obteve-se $Ø_{BM,b,5I,Qr\leq142m^3/s}=0.1952*Q_{r,5I}+8.2103$ com $r^2_{5I,Qr}=0.73$, $r_{b,Qr}=0.85$, $p<0.05$, $N_{b,5I}=6$, para os médios $Ø_{BM,m,5I,Qr\leq142m^3/s}=0.2192*Q_{r,5I}+12.266$ com $r^2_{5I,Qr}=0.76$, $r_{5I,Qr}=0.87$, $p<0.05$, $N_{5I}=6$ e para os escoamentos de superfície $Ø_{BM,s,5I,Qr\leq142m^3/s}=0.2567*Q_{r,5I}+15.645$ com $r^2_{5I,Qr}=0.67$, $r_{s,Qr}=0.82$, $p<0.05$, $N_s=6$.

Os resultados obtidos nesta fase da maré permitiram estimar para as condições hidrodinâmicas que têm vindo a ser analisadas definidas por $0.9\leq A_{w,5I}\leq2.5m$ e $Q_{r,5I}\leq142m^3/s$, amplitudes de variação da distorção dos escoamentos de fundo compreendidas entre os $4°\leq Ø_{BM,b,5I}\leq43°$, para os escoamentos médios distorções de $8°\leq Ø_{BM,s,5I}\leq51°$ e para os escoamentos de superfície distorções compreendidas entre os $12°\leq Ø_{BM,s,5I}\leq58°$, a que lhes corresponderam magnitudes médias da ordem dos $\bar{Ø}_{BM,b,5I}\approx23.5°$, dos $\bar{Ø}_{BM,m,5I}\approx29.3°$ e dos $\bar{Ø}_{BM,s,5I}\approx35.2°$,

respectivamente. Estes resultados realçaram para esta fase final da vazante, que as estofas da BM tenderam a apresentar maiores atrasos relativamente às BM, desde o fundo para a superfície dos escoamentos. Estes atrasos, foram mais elevados quer sob marés de maior amplitude, quer sob maiores descargas do Mondego. A análise das diferenças relativas médias ocorridas entre as distorções dos diferentes níveis em análise, também apontou para que este aumento da distorção na coluna de água tenho sido mais ou menos constante, dado que $\bar{\emptyset}_{BM,m,5I} - \bar{\emptyset}_{BM,b,5I} \approx 5.8°$ e $\bar{\emptyset}_{BM,s,5I} - \bar{\emptyset}_{BM,m,5I} \approx 5.9°$.

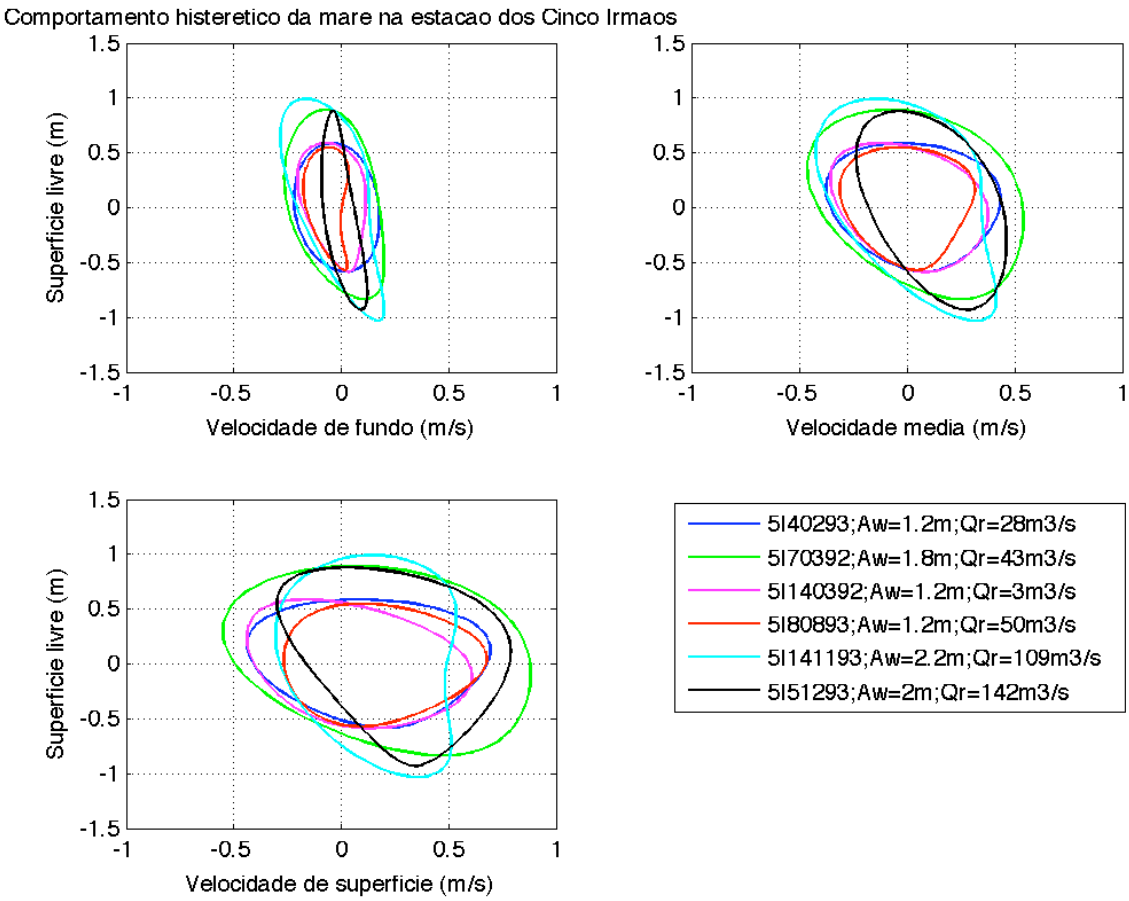


Figura 5.3.5. 19. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação dos Cinco Irmãos.

Porém, as distorções registadas nos escoamentos de fundo mesmo sob baixos regimes do Mondego, terão reflectido a interacção das duas componentes (o atrito de fundo e a distorção fluvial), uma vez que as leituras de $\emptyset_{BM,b,5I,Qr\leq 43m^3/s}$ reproduziram condições hidrodinâmicas nesta

estação praticamente coincidentes com as posições mais recuadas do limite superior da ZM de cada ciclo de maré, no canal principal do estuário. Estes quadros hidrodinâmicos foram anteriormente fundamentados no item 5.3.1.2, tendo por base a análise dos diagramas de variação da salinidade destas séries de dados. Com estes resultados tornou-se inviável a estimação da contribuição relativa que cada uma das principais componentes intervenientes na distorção dos escoamentos apresentou nesta fase da maré, tendo por base o modelo anteriormente proposto, tanto que a contribuição relativa de ambas terá feito sentir em toda a coluna de água.

A comparação das distorções registadas nestas duas fases da maré, nesta estação, realçou que as maiores magnitudes tiveram lugar na BM, principalmente em resultado da menor altura da coluna de água e consequente maior interacção dos escoamentos com o fundo do canal, mas também, relacionadas pelo facto de as descargas do Mondego não terem tido caudais regulares ao longo de cada ciclo de maré.

Quando comparadas as magnitudes médias da distorção $\bar{\text{Ø}}_{BM,z}$ registadas nos Cinco Irmãos com as da Embocadura, foi possível verificar que junto ao fundo a distorção foi muito semelhante nas duas estações (com $\bar{\text{Ø}}_{BM,b,5I} \approx \bar{\text{Ø}}_{BM,b,Emb} \approx 23°$), enquanto na parte superficial dos escoamentos constatou-se uma tendência de aumento da distorção em direcção à foz (com $\bar{\text{Ø}}_{BM,s,Emb} \approx 68° > \bar{\text{Ø}}_{BM,s,5I} \approx 35°$). Esta terá estado relacionada com uma circulação residual dos escoamentos de superfície na estação da Embocadura, para onde confluíram nesta fase final da vazante as massas de água provenientes quer do braço norte, quer do braço sul.

5.3.5.4.4. Estação Elevatória

Na estação mais proximal do estuário foram relacionadas as distorções dos escoamentos aferidas ao longo da coluna de água na preia-mar ($\text{Ø}_{PM,z,EE}$) com os principais mecanismos de transporte. Apenas com a variação da altura da maré foram definidas tendências de variação, que

expressaram um aumento da distorção dos escoamentos sob marés de maior amplitude. Estas basearam-se em regressões definidas por $Ø_{PM,b,EE} \approx 4.69 * A_{w,EE} - 3.18$ com $r^2_{b,Aw}=0.84$, $r_{b,Aw}=0.88$, $N_{b,EE}=3$ para os escoamentos de fundo; por $Ø_{PM,m,EE} \approx 3.03 * A_{w,EE} - 1.76$ com $r^2_{m,Aw}=0.76$, $r_{m,Aw}=0.88$, $N_{m,EE}=3$ para os médios, e por $Ø_{PM,s,EE}=4.47 * A_{w,EE} - 5.30$ com $r^2_{s,Aw}=0.70$, $r_{s,Aw}=0.50$, $N_{s,EE}=3$ para os de superfície. Apenas nos escoamentos médios e de superfície foram obtidas tendências de variação igualmente positivas, entre $Ø_{PM,z,EE}$ e a variação da descargas do Mondego, mas baseadas em menores coeficientes de correlação, com $r^2_{m,Qr}=0.46$, $r_{m,Qr}=0.68$, $N_{m,EE}=3$; $r^2_{s,Qr}=0.73$, $r_{s,Qr}=0.85$, $N_{s,EE}=3$.

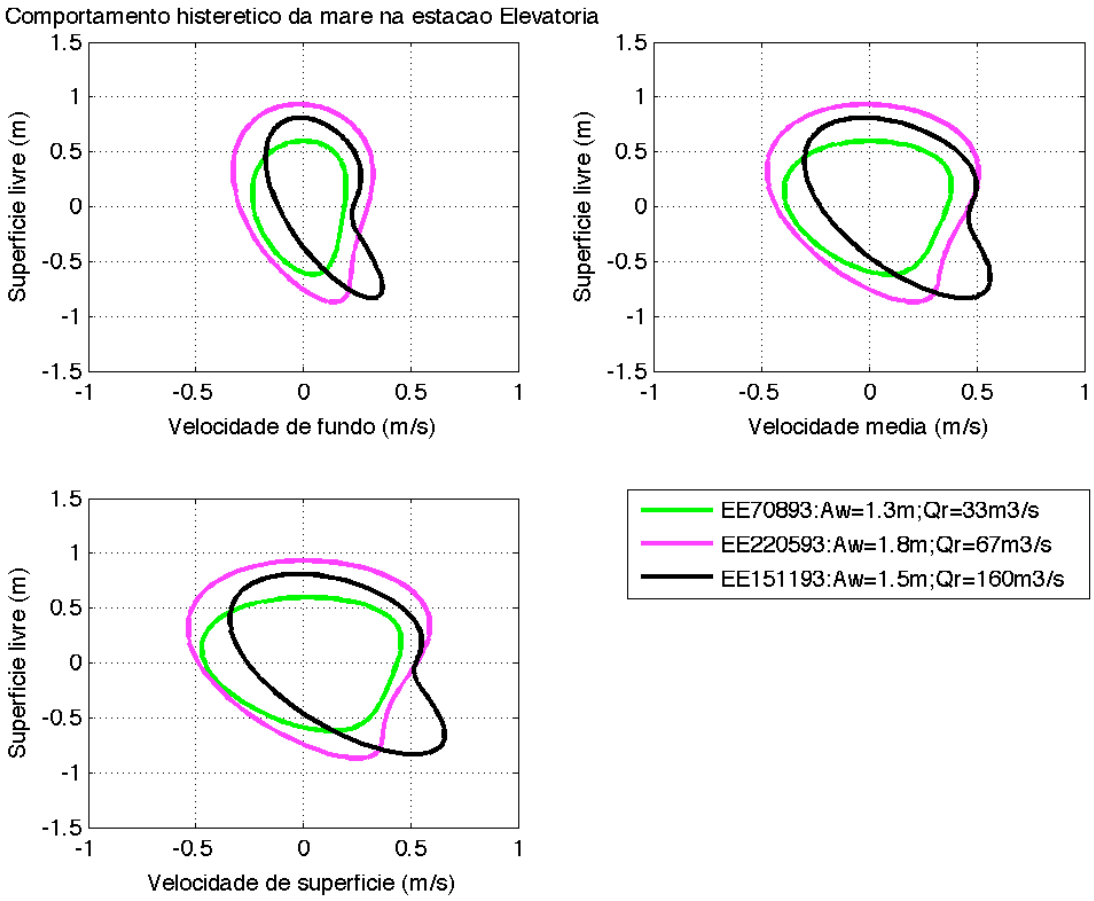


Figura 5.3.5. 20. Comportamento histerético dos ciclos de maré aferidos na estação Elevatória.

Na coluna de água, as primeiras destacaram distorções mais elevadas junto ao fundo e mais pequenas para a superfície. Definiram para as condições hidrodinâmicas analisadas nas restantes estações, amplitudes de variação da distorção compreendidas entre os $8° \leq Ø_{PM,b,EE} \leq 15°$ para os

escoamentos de fundo, entre os $1° \leq Ø_{PM,m,EE} \leq 6°$ para os médios, e entre os $-1° \leq Ø_{PM,s,EE} \leq 6°$ para os escoamentos de superfície. Os respectivos valores médios corresponderam a $\bar{Ø}_{PM,b,EE} \approx 11.2°$, a $\bar{Ø}_{PM,m,EE} \approx 3.4°$ e a $\bar{Ø}_{PM,s,EE} \approx 2.3°$, respectivamente. Muito embora o número reduzido de leituras de $Ø_{PM,z,EE}$ efectuadas nesta estação, os resultados obtidos apontaram para que se tenha verificado um decréscimo relativo da distorção dos escoamentos ao longo do troço proximal do canal principal do estuário, nesta fase.

Entre as estações dos Cinco Irmãos e Elevatória, a distorção terá decrescido em média dos $\bar{Ø}_{PM,m,5I} \approx 7.8°$ para os $\bar{Ø}_{PM,m,EE} \approx 3.4º$ em resultado de se ter verificado um menor retardamento dos escoamentos de enchente por parte do fundo e da fisiografia deste troço de canal, que se apresentava completamente regularizado, desprovido de ambientes intermareais, com um traçado longitudinal muito rectilíneo e com uma batimetria muito regular (figura 2.2). Estes resultados também terão reflectido em parte o facto de esta estação ter estado localizada na Zona Fluvial do estuário (ZF), local sujeito apenas à maré dinâmica (com $S_{PM,b,EE}=0‰$) e com uma hidrodinâmica regulada basicamente pelas descargas do Mondego, pelo que as magnitudes de $Ø_{PM,z,EE}$ terão sido fundamentalmente representadas pela distorção fluvial. Este comportamento da distorção $Ø_{PM,z,x}$ coligado com o registo de um aumento relativo da variação quer da componente vertical, quer da horizontal da maré (anteriormente demonstrado nos itens 5.2.1 e 5.3.2) apontaram para que a fisiografia deste troço de canal tenha propiciado a propagação da maré, à semelhança do considerado por Blanton *et al* (2002).

Na baixa-mar, as distorções registadas nesta estação apenas definiram tendências de variação com os caudais do Mondego. Para os níveis em análise obtiveram-se regressões positivas descritas em graus por $Ø_{BM,b,EE} \approx 0.15 * Q_{r,EE} + 8.8$ com $r_{b,Qr}=0.988$, $N_{b,EE}=3$ para os escoamentos junto ao fundo; por $Ø_{BM,m,EE} \approx 0.15 * Q_{r,EE} + 11.2$ com $r_{m,Qr}=0.997$, $p<0.05$, $N_{m,EE}=3$ para os escoamentos

médios, e por $Ø_{BM,s,EE} \approx 0.13 * Q_{r,EE} + 13.8$ com $r_{s,Qr}=0.986$, $N_{s,EE}=3$ para os de superfície. Apenas a regressão obtida nos escoamentos médios foi significativa. Estes resultados para além de terem apontado para um aumento da distorção na coluna de água do fundo para a superfície, permitiram associar as maiores distorções com as maiores descargas do Mondego. Também possibilitaram estimar a amplitude de variação da distorção destes escoamentos, para valores compreendidos entre os $9° \leq Ø_{BM,b,EE} \leq 30°$ junto ao fundo, entre os $11° \leq Ø_{BM,m,EE} \leq 32°$ nos escoamentos médios e entre os $14° \leq Ø_{BM,s,EE} \leq 33°$ junto à superfície. Estes foram representados por valores médios de $\bar{Ø}_{BM,b,EE} \approx 18°$, de $\bar{Ø}_{BM,m,EE} \approx 19.9°$ e a $\bar{Ø}_{BM,s,EE} \approx 21.6°$, respectivamente. Comparadas as distorções médias registadas nestas duas fases opostas da maré, apurou-se que na BM as magnitudes foram muito superiores, e ter-se-ão relacionado com uma maior interacção dos escoamentos fluviais descendentes com o fundo do canal.

Subcapítulo 5.4. Transporte Sedimentar no Estuário do Mondego

O transporte sedimentar nos canais de fundo móvel, desprovido de propriedades coesivas num estuário, é caracterizado por uma grande complexidade, dados os múltiplos e intrincados factores que o controlam. Os processos envolvidos ocorrem principalmente na zona perto do fundo (Yalin, 1977), pelo que se torna da maior importância conhecer as condições locais do escoamento, os seus sedimentos, e também o transporte sedimentar, uma vez que tudo isto reflecte as condições naturais e permite visualizar e melhor compreender o seu funcionamento.

5.4.1. Caracterização dos Sedimentos

Os sedimentos colhidos em vários ambientes na zona costeira e domínio fluvial adjacentes ao estuário, evidenciaram características petrográficas distintas. As areias fluviais apresentaram granulometrias mais grosseiras que as areias marinhas. Corresponderam a sedimentos mal calibrados, com distribuições polimodais, diferenciando-se frequentemente subpopulações com tamanhos distintos. Para além da componente quartzosa são os teores de feldspatos, micas, quartzitos, xistos e grauvaques os diferenciam os sedimentos fluviais dos marinhos. Os sedimentos marinhos, eram caracterizados por materiais detríticos terrígenos de areia quartzosa, de calibração média a boa, podendo apresentar por vezes lentículas de cascalho. Apresentavam também uma abundância relativa de componentes carbonatados.

No estuário foi possível estabelecer uma discriminação petrográfica dos sedimentos em função da sua posição no sistema e no seu contexto hidrodinâmico, diferenciando-se assim vários domínios dinâmico-sedimentares.

Os sedimentos que constituíam o sector distal do estuário, representado pela embocadura e pelos sectores distais dos braços norte e sul (*vidé* figuras 2.2 e 2.3) apresentavam uma grande identidade petrográfica com as areias marinhas adjacentes. Tal como os sedimentos em deriva litoral, sofreram incrementos em areia grosseira durante o Outono e Inverno e areia média nos períodos de menor agitação marítima (figura 5.4. 1). A contaminação de materiais fluviais pareceu

ter sido reduzida (Duarte & Reis, 1993). Nos domínios submareais do sector distal do braço sul foram observados megariples e pequenas dunas, cobertos por pequenos ripples. Enquanto nas barras de maré, observaram-se megarriples cobertos por pequenos ripples, estando a sua amplitude e forma, relacionada com hidrodinamismo (Baptista *et al*, 1995). Nesta áreas intermareais, nas marés vivas por exemplo, observam-se megariples lunares com comprimentos de onda que podem exceder os 1.4 metros e os 0.2 m de altura.

Os sectores médio-proximal do braço norte foram caracterizados por sedimentos submareais com características polimodais, com algum cascalho e lutitos e com uma composição mineralógica indiciadora de serem sedimentos de mistura, aparentando teores em quartzitos, xistos e grauvaques indiciadores de uma origem fluvial. Os afluxos de cascalho e de areias grosseiras coincidiram com os períodos de maiores caudais fluviais (Duarte & Reis, 1993). Nestes ambientes submareais, por vezes foram observados na sua cobertura sedimentar, megariples, que em fases de menor hidrodinamismo apresentam cristas rectilíneas ou ligeiramente sinuosas, e nas fases de maior hidrodinamismo, ostentaram cristas oblíquas e muito sinuosas. Nos domínios intermareais deste sector do estuário, as barras de maré marginais apresentam estruturas planares, estrias, e "ripples" (com cristas rectilíneas, sinuosas, oblíquas, romboides, entre outras), função da sua posição no sistema dinâmico da barra, e também função do regime mareal (Baptista *et al*, 1995). Realça-se que em determinados sectores destas barras, em posições mais próximas do centro do canal principal, observaram-se na baixa-mar ripples e "tool marks" de enchente, tradutores de um domínio das fases de enchente.

Os sedimentos do Leito regularizado do Baixo Mondego, que correspondeu ao troço superior do estuário, apresentaram distribuições granulométricas e composições características das areias do Mondego. Nos ambientes submareais eram definidos por areia grosseira mal calibrada, com fracção fina e cascalhenta, formando ripples e megarriples de crista sinuosa, catenária e por vezes também linguloide. Nas barras intermareais marginais, os sedimentos eram de areia média

mal calibrada com alguma matéria orgânica e apresentavam pequenos ripples. Nas margens artificiais apresentavam areia siltosa e siltes arenosos com matéria orgânica.

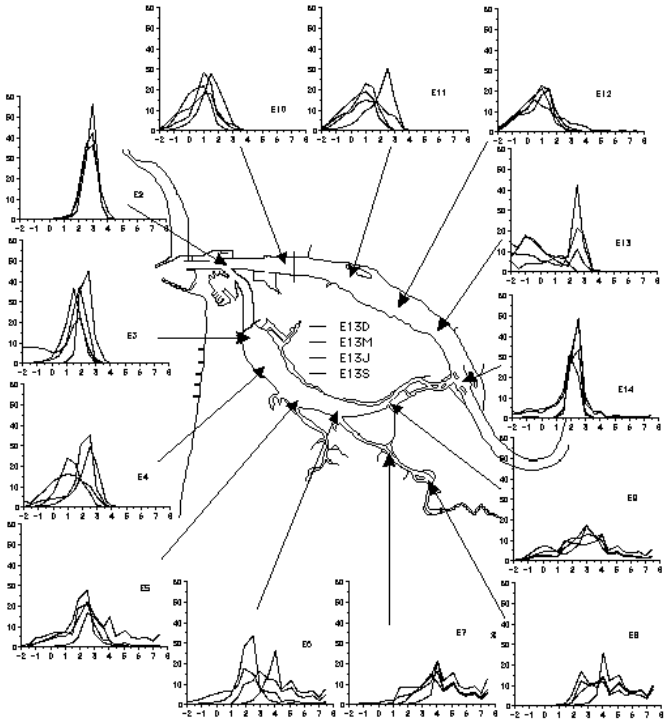


Figura 5.4. 1. Curvas de distribuição granulométrica de sedimentos de fundo amostrados nos dois braços do estuário.

Os sectores médio-proximal do braço sul, contrariamente aos outros domínios, foram caracterizados por sedimentos lutíticos com elevados teores em carbonatos e em matéria orgânica. Apresentaram oscilações granulométricas anuais pouco significativas, em que os sedimentos mais arenosos e com menores teores em matéria orgânica surgem durante o Outono e o Inverno, enquanto os mais finos e mais ricos em carbonatos durante a época estival (figura 5.4. 1). De acordo com Duarte & Reis (1993) as características petrográficas apresentadas sugerem um regime hidrodinâmico calmo, regido essencialmente por correntes mareais e com uma grande estabilidade hidrodinâmica anual, em contraste com os do braço norte e do sector distal do braço sul que evidenciam regimes de alto hidrodinamismo com fortes variações anuais. Nos canais de maré principal apresentava uma transição de areia mal calibrada no sector distal para sedimentos lutíticos a montante. As barras intermareais eram constituídas por sedimento arenoso mal calibrado rico em

conchas, podendo apresentar ripples de crista rectilínea ou sinuosa, que se convertiam em ripples de crista oblíqua, catenária, ou até mesmo, linguloide, aquando do aumento da amplitude das marés, e da proximidade do canal principal. Na parte anterior da grande barra arenosa longitudinal localizada em frente à ponte da Gala, puderam-se observar na baixa-mar, zonas de "ripples" e "tool marks" de enchente, tradutoras da importância dinâmica da fase da enchente neste sector do braço sul. Nos sectores mais interiores deste domínio dinâmico-sedimentar, representado pelo canal do rio pranto, as vasas intermareais tornaram-se progressivamente mais finas e mais ricas em matéria orgânica para montante, constituindo este subsistema uma das zonas mais protegidas de todo o estuário.

Os ambientes antrópicos protegidos, definidos no quadro 2.1, e representados pelo Porto de pesca, pela Doca dos bacalhoeiros e pela Doca de recreio apresentam fundos com sedimento vasoso, com estrutura laminar.

Segundo a classificação definida por Trefethen (1950), os sedimentos na altura em trânsito no estuário, correspondiam a areias, a areias siltosas e a siltes arenosos (Duarte & Reis, 1993; Baptista *et al*, 1995).

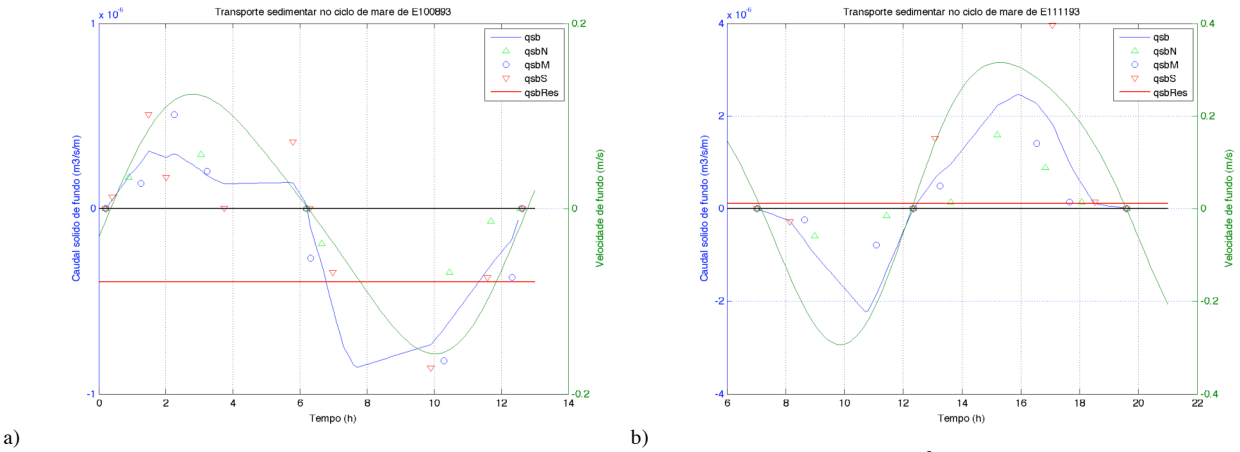
5.4.2. Taxas de Transporte Sedimentar Medidas no Estuário

Os vários ciclos de maré medidos na estação da Embocadura decorreram sob marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6$m e descargas do Mondego de $26 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$. Estas variantes condicionaram as taxas de transporte sedimentar de fundo médias, por metro linear, determinadas para as fases da enchente ($q_{sb/m,e}$) e para as fases da vazante ($q_{sb/m,v}$), que abrangeram um leque de magnitudes compreendidas entre os $-2.03 \times 10^{-5} \leq q_{sb/m,e,E} \leq -1.78 \times 10^{-4} m^3/s/m$, e os $1.76 \times 10^{-5} \leq q_{sb/m,v,E} \leq 2.03 \times 10^{-4} m^3/s/m$ (quadro 5.4. 1).

Seleccionou-se no gráfico a) na figura 5.4. 2 um quadro hidrodinâmico considerado representativo da generalidade dos caudais do Mondego, com descargas de apenas $Q_r \approx 27 m^3$ e no gráfico b) apresenta-se um quadro oposto, com caudais do Mondego elevados, com $Q_r \approx 155 m^3/s$, mas representativo de curtos períodos de tempo. Da sua análise, verificou-se que as maiores taxas

de $q_{sb/m,e}$ e $q_{sb/m,v}$ foram registadas sempre no sector sul desta estação, com grandezas similares às obtidas nas outras estações. Porém, no sector diametralmente oposto, no perfil norte, as taxas de $q_{sb/m,y}$ revelaram-se inferiores, pelo que as taxas de transporte sedimentar de fundo estimadas para a secção e posteriormente integradas para o ciclo de maré, apresentaram por regra magnitudes mais pequenas as medidas nas restantes estações, para as mesmas condições hidrodinâmicas. Este facto relacionou-se com o tipo de fundo apresentado pelo sector norte da Embocadura, que em grande parte das campanhas realizadas, era definido pelo "bedrock" Jurássico. Desta forma, os resultados obtidos apontam para que a disponibilidade de sedimento a montante e a jusante desta estação, condicione em grande parte o transporte de fundo na estação da Embocadura. Acresce, também o facto de não terem sido definidas quaisquer tendências de variação de $q_{sb/m,e}$ com a magnitude dos principais agentes dinâmicos em estudo, ao contrário do que sucedeu com as restantes estações.

Para representar os vários quadros de transporte sedimentar nesta estação, escolheram-se dois ciclos de maré, que se ilustram nos gráficos da figura 5.4. 2. O gráfico a) representa um ciclo de maré em que a resultante do transporte sedimentar de fundo (q_{sb}) se fez segundo a enchente, enquanto o gráfico b) a resultante do transporte sedimentar de fundo faz-se segundo a vazante.



a) b)

Figura 5.4. 2. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré). Nos gráficos a) e b) relacionam-se os caudais sólidos e a velocidade de fundo, respectivamente nos ciclos de maré E100893 e no E111193. Na legenda da figura, q_{sb} representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal, linearmente interpolado, $q_{sb,N}$ o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem E(N), o $q_{sb,M}$ o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem E(M), e $q_{sb,S}$ o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem E(S). Por fim, $q_{sb,Res}$ representou o caudal sólido de fundo residual.

Determinados os volumes sólidos de fundo transportados durante as fases da enchente ($q_{sb,e}$) e da vazante ($q_{sb,v}$) nos vários ciclos de maré, constatou-se que estes apresentaram magnitudes compreendidas entre os $-1.1 \leq q_{sb,e,E} \leq -3 m^3$/ciclo de maré, e volumes de vazante de $0.4 \leq q_{sb,v,E} \leq 5.5 m^3$/ciclo de maré (quadro 5.4. 1). Estes, definiram volumes sedimentares de fundo residuais para cada ciclo, compreendidos entre os $-1.3 \leq q_{sb,E} \leq 2.8 m^3$.

Os ciclos de maré estudados na estação dos Cinco Irmãos foram representativos de quadros de maré $1.2 \leq A_{w,5I} \leq 2.1$m e descargas do Mondego de $3 \leq Q_{r,5I} \leq 142 m^3$/s.

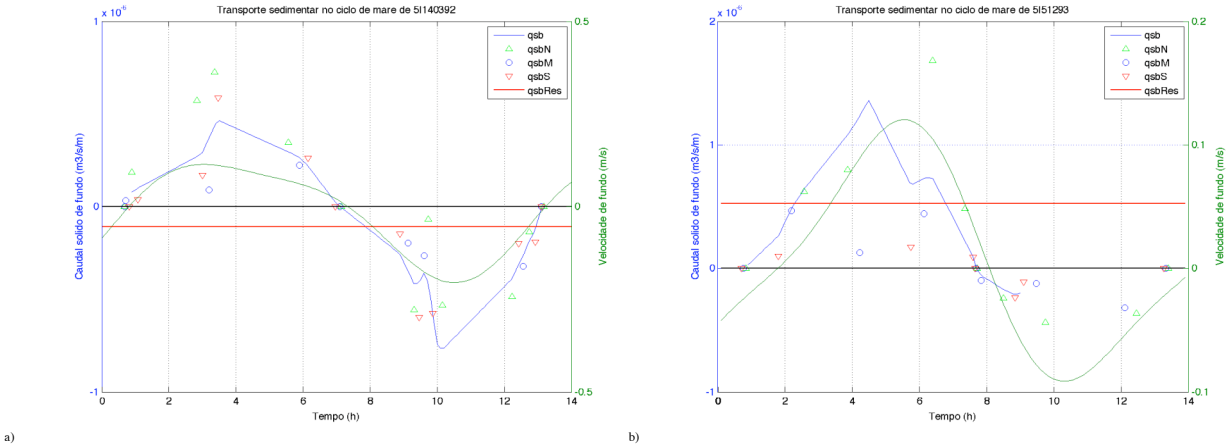


Figura 5.4. 3. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré). Nos gráficos a) e b) relacionam-se os caudais sólidos e a velocidade de fundo, respectivamente nos ciclos de maré 5I140392 e no 5I511293. Na legenda da figura, q_{sb} representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal, linearmente interpolado, $q_{sb,N}$ o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem 5I(N), o $q_{sb,M}$ o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem 5I(M), e $q_{sb,S}$ o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem 5I(S). Por fim, $q_{sb,Res}$ representou o caudal sólido de fundo residual.

As taxas médias do transporte sedimentar de fundo determinadas para os vários ciclos de maré, oscilaram entre os $-9.74 \times 10^{-5} \leq q_{sb/m,e,5I} \leq -1.59 \times 10^{-4} m^3$/s/m para as fases da enchente, e entre os $5.07 \times 10^{-5} \leq q_{sb/m,v,5I} \leq 1.53 \times 10^{-4} m^3$/s/m para as fases da vazante (quadro 5.4. 1). Estas condições condicionaram as taxas de transporte sedimentar de fundo médias, por metro linear, determinadas para as fases da enchente ($q_{sb/m,e}$) e para as fases da vazante ($q_{sb/m,v}$), que abrangeram um leque de magnitudes compreendidas entre os $-2.03 \times 10^{-5} \leq q_{sb/m,e,5I} \leq -1.78 \times 10^{-4} m^3$/s/m, e os $1.76 \times 10^{-5} \leq q_{sb/m,v,5I} \leq 2.03 \times 10^{-4} m^3$/s/m.

Às anteriores taxas, corresponderam volumes de sedimento transportado durante as fases da enchente compreendidos entre os $-0.4 \leq q_{sb,e,5I} \leq -2.5 m^3$, durante a vazante da ordem dos

$1.3 \leq q_{sb,v,5I} \leq 4.4 m^3$ e um transporte residual para os vários ciclos de maré de $0.5 \leq q_{sb,5I} \leq 3.2 m^3$. Estes volumes de sedimento definiram tendências de variação proporcionais com a razão de fluxo, muito embora não significativas.

As taxas de transporte sedimentar determinadas para os três ciclos de maré aferidos na estação Elevatória, localizada no sector mais distante da foz, decorreram sob marés de $1.2 \leq A_{w,EE} \leq 1.8 m$ e descargas do Mondego de $33 \leq Q_{r,EE} \leq 160 m^3/s$. Para as fases da enchente definiram-se magnitudes compreendidas entre os $-1.52 \times 10^{-4} \leq q_{sb/m,e,EE} \leq -3.03 \times 10^{-4} m^3/s/m$, enquanto para as de vazante foram compreendidas entre os $1.90 \times 10^{-4} \leq q_{sb/m,v,EE} \leq 2.69 \times 10^{-4} m^3/s/m$ (quadro 5.4. 1). Na figura apresentam-se as taxas de transporte sedimentar medidas para o ciclo de maré EE151193 que decorreu sob elevadas descargas do Mondego ($Q_r \approx 160 m^3/s$), o qual representou a maior taxa de transporte sedimentar residual medida no estuário, e que foi favorável ao movimento em direcção à foz.

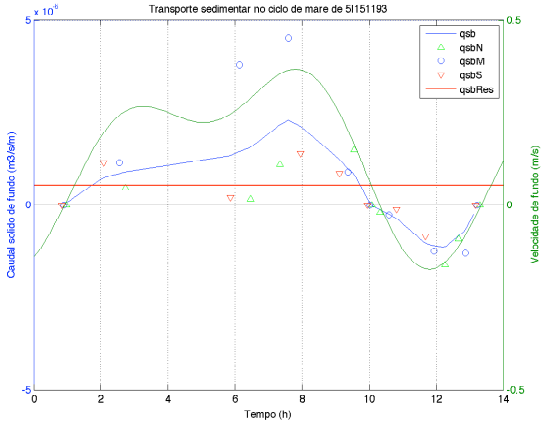
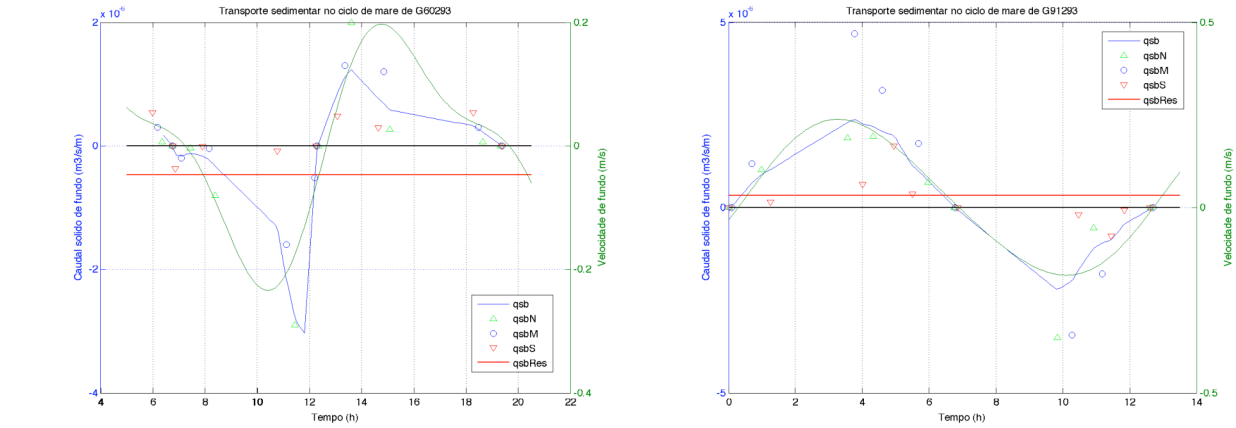


Figura 5.4. 4. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré) medidos na estação Elevatória, no ciclo de maré EE151193. Na legenda da figura, q_{sb} representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal, linearmente interpolado, $q_{sb,N}$ o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem EE(N), o $q_{sb,M}$ o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem EE(M), e $q_{sb,S}$ o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem EE(S). Por fim, $q_{sb,Res}$ representou o caudal sólido de fundo residual.

Os volumes de sedimento em transporte nestes ciclos foi da ordem dos $-1.9 \leq q_{sb,e,EE} \leq -4.8 m^3$ por ciclo de maré, para a fase da enchente e da ordem dos $5 \leq q_{sb,v,EE} \leq 8.6 m^3$ para a fase de vazante. Os volumes residuais de sedimento em transporte para cada ciclo foram da ordem dos $0.8 \leq q_{sb,EE} \leq 6.8 m^3$, tendo os valores mais pequenos estado associados às menores descargas do Mondego, e *vice versa*.

Foram seleccionados dois dos dez ciclos de maré amostrados na estação da Gala, considerados representativos dos quadros dinâmicos registados nesta estação. Os resultados obtidos abrangeram marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_{w,Gala} \leq 2.6m$ e descargas do Pranto de $Q_r \leq 46m^3/s$.

Da análise do gráfico a) da figura 5.4. 5 que foi expressivo dos quadros hidrodinâmicos anualmente mais representativos, com caudais do pranto da ordem dos $Q_r \approx 1m^3/s$, foi possível determinar que os volumes de sedimento transportados para o interior foram superiores aos dos volumes transportados durante a vazante, definindo um transporte residual no sentido da enchente da ordem dos $1.2m^3$ por ciclo de maré.



a) b)

Figura 5.4. 5. Taxas de transporte sedimentar de fundo por metro linear (m^3/m/ciclo de maré). Nesta figura, (q_{sb}) representou o caudal sólido de fundo médio na secção transversal linearmente interpolado, ($q_{sb,N}$) o caudal sólido de fundo determinado no ponto de amostragem G(N), ($q_{sb,M}$) o caudal sólido de fundo medido no ponto de amostragem G(M), ($q_{sb,S}$) o caudal sólido de fundo aferido no ponto de amostragem G(S), e por fim, ($q_{sb,Res}$) representou o caudal sólido de fundo residual. No gráfico a) relacionaram-se os caudais sólidos (q_{sb}) com a velocidade de fundo no ciclo de maré G60293. O volume de sedimento que entrou durante a enchente foi superior ao que saiu durante a vazante, em aproximadamente $0.5m^3$/ciclo maré.

Nestes quadros dominados pela maré a resultante do transporte sedimentar fez-se segundo a enchente e concordantemente com a velocidade de fundo média. Constatou-se também, ter havido uma tendência para circulação de maiores volumes de sedimentos durante as marés de maior amplitude e menor volume sob marés mortas (quadro 5.4.1 e figura 5.4.5).

Nos quadros definidos por maiores caudais do Pranto (de que é exemplo o gráfico b) da figura 5.4.5, com $Q_{r,Gala} > 20m^3/$), verificou-se que a curva de variação do caudal sólido por metro linear ($q_{sb/m,Gala}$), apresentou uma grande semelhança morfológica com a curva de variação da velocidade

de fundo, associando os maiores caudais $q_{sb/m,Gala}$ às maiores velocidades e *vice versa*. Os volumes de sedimento em circulação junto ao fundo nas duas fases passaram também a ser maiores.

		Aw (m)	Qr (m3/s)	Ufm,v (m/s)	Ufm,e (m/s)	P / R (-)	qsb/m,v (m3/s/m)	qsb/m,e (m3/s/m)	q,sb,V (m3)	q,sb,E (m3)	q,sbT (m3)
Embocadura	E100893	0.90	27	0.08	-0.10	0.42	2.81E-05	-9.15E-05	0.6	-2.0	-1.3
	E150392	1.35	37	0.14	-0.10	0.58	3.15E-05	-4.99E-05	0.7	-1.1	-0.3
	E80392	1.46	26	0.10	-0.15	0.94	1.76E-05	-2.03E-05	0.4	-1.1	-0.7
	E190593	1.37	92	0.11	-0.13	0.19	6.15E-05	-6.90E-05	1.6	-1.2	0.4
	E70293	2.57	124	0.20	-0.11	0.28	1.72E-04	-1.02E-04	4.6	-1.8	2.8
	E111193	2.31	155	0.21	-0.18	0.18	2.03E-04	-1.78E-04	5.5	-3.0	2.5
Gala	G61291	1.80	12	0.19	-0.15	1.93	4.93E-04	-4.99E-04	10.8	-11.1	-0.3
	G201291	1.78	30	0.22	-0.14	0.79	5.51E-04	-6.01E-04	13.5	-12.1	1.4
	G50392	1.45	46	0.27	-0.13	0.35	5.54E-04	-3.30E-04	12.8	-7.0	5.7
	G160392	1.93	30	0.20	-0.12	0.81	3.57E-04	-1.41E-04	8.6	-2.8	5.8
	G60293	2.25	1	0.10	-0.14	1428	1.00E-04	-1.85E-04	2.5	-3.7	-1.2
	G200593	1.95	11	0.15	-0.09	2.23	1.57E-04	-3.25E-04	3.6	-7.0	-3.5
	G110893	0.87	4	0.08	-0.06	1.11	7.87E-05	-1.51E-04	1.8	-3.3	-1.5
	G121193	2.56	38	0.23	-0.14	1.04	4.12E-04	-2.22E-04	10.2	-4.3	5.9
	G91293	1.74	20	0.15	-0.11	1.05	2.52E-04	-1.94E-04	6.3	-3.8	2.4
	G60295	1.20	34	0.10	-0.03	0.20	3.95E-05	-4.06E-05	1.0	-0.8	0.3
Cinco Irmãos	5I140392	1.21	3	0.07	-0.12	7.96	6.79E-05	-9.66E-05	1.6	-2.1	-0.5
	5I40293	1.20	28	0.12	-0.14	0.68	5.07E-05	-9.74E-05	1.3	-1.9	-0.6
	5I70392	1.79	43	0.14	-0.16	0.85	1.31E-04	-1.19E-04	3.4	-2.2	1.3
	5I80893	1.19	50	0.02	-0.11	0.33	1.37E-04	-1.39E-04	3.5	-2.5	1.0
	5I141193	2.10	109	0.13	-0.17	0.39	1.53E-04	-1.59E-04	4.4	-2.5	1.9
	5I51293	1.96	142	0.07	-0.06	0.15	1.30E-04	-2.81E-05	3.7	-0.4	3.2
Elevatória	EE220593	1.83	67	0.21	-0.20	0.43	1.95E-04	-3.03E-04	5.6	-4.8	0.8
	EE70893	1.25	33	0.14	-0.15	0.52	1.90E-04	-1.93E-04	5.0	-3.5	1.5
	EE151193	1.52	160	0.25	-0.11	0.09	2.69E-04	-1.52E-04	8.6	-1.9	6.8

Quadro 5.4. 1. Taxas de transporte sedimentar de fundo determinadas para cada ciclo de maré, nas estações da Embocadura, Gala, Cinco Irmãos e Elevatória. As siglas A_w e Q_r representam a altura da maré e a magnitude dos caudais fluviais, enquanto as $U_{f,v}$, $U_{f,e}$, P/R definiram as velocidades de fundo médias da fase da vazante e da enchente, e o inverso da Razão de fluxo, de cada ciclo de maré. As siglas $q_{sb/m,v}$; $q_{sb/m,e}$ representaram as taxas médias do transporte sedimentar de fundo na fase da vazante e na enchente, por metro linear. As siglas $q_{sb,v}$; $q_{sb,e}$ e q_{sb}, definiram as taxas de transporte sedimentar médias expressas em volume, para as fases da vazante e da enchente, e o respectivo transporte residual para cada ciclo de maré.

Na estação da Gala, também foram registados os maiores volumes de sedimento em circulação nas diferentes fases da maré, de entre as estações em estudo, bem como, os maiores volumes de sedimento residual por ciclo de maré. Os maiores volumes de sedimento registados em transporte nesta estação aconteceram quer sob descargas muito elevadas do Pranto ($30 \leq Q_{r,Gala} \leq 46 m^3/s$), quer sob marés vivas. Muito embora a hidrodinâmica deste braço tenha sido inferior à do canal principal, a localização da estação da Gala num sector com fundos atapetados com grandes estruturas sedimentares, conferiram elevadas rugosidades hidráulicas e tensões de corte de fundo, mas também a grande disponibilidade de sedimentos desprovidos de propriedades coesivas a montante e a jusante desta estação, fundamentam estes resultados.

Também contribuiu, o aumento da velocidade dos escoamentos que se registou durante as fases da vazante (em especial durante as maré vivas), que resultou do efeito de convergência gerado com o afunilamento da secção do canal. Este fenómeno, quando conciliado com o efeito de represamento de água nos extensos ambientes intermareais localizados nos domínios médio-

proximal do braço sul, justificaram a ocorrência na estação da Gala de vazantes mais longas e velocidades mais elevadas às da enchente, e consequentemente por se ter considerado um domínio da vazante nesta estação.

Comparados os volumes sedimentares em circulação junto ao fundo nos dois braço do estuário, constatou-se que em média foram mais elevados na estação da Gala. Também se verificou que os volumes de sedimento transportados durante as fases da enchente e vazante nas estações da Gala, 5I e EE definiram tendências de variação directas com a Razão de Fluxo, enquanto na embocadura não se registaram, em grande parte por nesta o transporte sedimentar ter estado muito condicionado pela disponibilidade de sedimento desprovido de propriedades coesivas, a montante e a jusante.

Impactes Antrópicos no Transporte Sedimentar

As obras realizadas no âmbito do Plano Geral do Aproveitamento Hidráulico do Rio Mondego ter-se-ão repercutido no estuário numa série de impactes quer ao nível da hidrodinâmica quer do transporte sedimentar. Com a construção de barragens e açudes a montante de Coimbra, estas passaram a regular as descargas fluviais correspondentes a 74% da área da bacia hidrográfica do Mondego e a eliminar ou minimizar a ocorrência de picos de cheia. Foram também responsáveis por uma redução significativa da carga sólida transportada para o Baixo Mondego que foi estimada anteriormente por Lencastre (1980) como tendo sido da ordem dos $175x10^6 m^3 ano^{-1}$([1]). Segundo Dias (1990), esta redução dos volumes sólidos transportados para jusante destas estruturas terá sido da ordem dos 80% nas principais bacias hidrográficas portuguesas, pelo que os volumes sólidos que passaram a transitar para o Baixo Mondego passaram a ser apenas da ordem dos $35x10^6 m^3 ano^{-1}$. Ficando o material detrítico retido fundamentalmente a montante desta estruturas e passando-se a verificar um assoreamento ao longo de determinados segmentos do Alto e Médio Mondego. O material detrítico continua a sofrer um decréscimo relativo ao longo do Leito Regularizado do

[1]. Volume médio erodido no Alto e Médio Mondego, antes da regularização da bacia hidrográfica.

Baixo Mondego até chegar ao estuário, por parte do caudal sólido transportado sob tracção ao longo do canal ficar retido a montante dos pequenos diques transversais construídos junto às pontes da Granja e da Formoselha, que têm por objectivo impedir a subida da maré para montante e conferir a este troço de canal de muito baixo declive (≈0.5/1000m) um perfil longitudinal do tipo em escada (Lencastre, 1980). Acresce, que o traçado artificial deste canal obstruiu a alimentação detrítica proveniente das formações sedimentares Meso-cenozoicas que lhe servem de substrato, ao inviabilizar a mobilidade lateral, e natural do rio, conferindo-lhe margens fixas de enrocamento. Desta forma, a componente sedimentar que cobre o fundo do LRBM, passou a ter como principal fonte detrítica o material proveniente das formações geológicas do Maciço Hespérico localizadas a montante de Coimbra. Uma vez que os principais afluentes deste rio no Baixo Mondego também estão regularizados, todos os volumes de água doce que chegam ao estuário encontram-se praticamente normalizados, quase que desprovidos de variabilidade natural das suas descargas, e reduzidos os seus aportes sedimentares para o estuário, mas não eliminados os picos de cheia.

Já no sector estuarino, a regularização de todo o traçado longitudinal do canal principal, para além de ter fomentado a entrada da maré para o interior do sistema e reforçado o domínio da enchente aquando dos quadros de mistura do tipo III e II, terá igualmente contribuído para que a resultante do transporte sedimentar de fundo tenha acompanhado esta assimetria na componente horizontal da maré, tal como, considerado por Fry & Aubrey (1990) e Mantovanelli *et al* (2204), e desta forma fomentar a entrada de sedimentos de origem marinha para sectores mais interiores da zona de mistura.

5.4.3. Modelo Conceptual de Circulação e do Transporte Sedimentar

Projectadas as resultantes do transporte sedimentar de fundo (q_{sb}) de cada ciclo de maré nos diagramas de estratificação-circulação anteriormente propostos para os dois canais mais importantes do estuário, obtiveram-se os modelos conceptuais representados nas figuras 5.4. 6 e 5.4. 7. Da análise destes foi possível constatar que as diferenças entre os dois canais não se

restringiu à circulação, à mistura e à estratificação de densidade, mas também ao transporte dos sedimentos de fundo.

No diagrama referente ao canal principal (figura 5.4. 6), a sua análise mostrou ter havido uma grande concordância entre a resultante do transporte sedimentar e os domínios previamente estabelecidos, de circulação, mistura e estratificação.

Os regimes de mistura e estratificação do tipo I, caracterizados por um domínio hidrodinâmico por parte dos caudais fluviais, e definidos por relações de $R/P<0.25$ no estuário do Mondego, foram igualmente caracterizados por transportes sedimentares de fundo residuais favoráveis à fase da vazante.

Para os quadros de mistura, circulação e estratificação bem misturado, do tipo III, definidos por um domínio hidrodinâmico por parte da maré, com $R/P>1$, verificou-se que o transporte sedimentar de fundo residual nas estações da Embocadura e nos Cinco Irmãos efectuou-se em sentido contrário, favoravelmente à fase da enchente.

Para os quadros intermédios, definidos por regimes parcialmente misturados do tipo II e representados no estuário por relações de $0.25<P/R<1$, a estação da Embocadura localizada no domínio marinho do estuário, continuou a expressar um domínio dos processos marinhos na regulação do transporte sedimentar de fundo, concordante com a sua proximidade à foz do estuário. Porém, na estação dos Cinco Irmãos, localizada mais a montante, na zona de mistura, o sentido do transporte sedimentar inverteu-se, passando a fazer-se segundo a vazante.

Sendo estes dois últimos quadros, os mais frequentes da hidrodinâmica do canal principal, os resultados obtidos apontam para que se continue a verificar uma tendência de assoreamento do sector portuário com sedimentos de origem marinha, mas também, que este assoreamento se estenda ao longo do braço norte, em resultado da convergência destes com os sedimentos em transporte em sentido contrário e provenientes do sector fluvial do estuário.

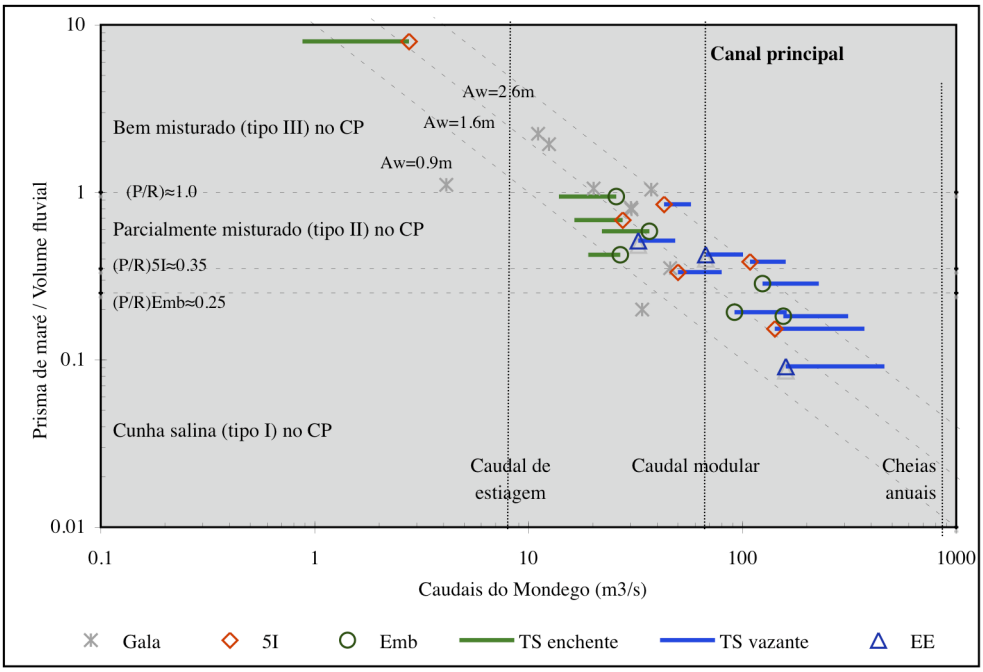


Figura 5.4. 6. Diagrama conceptual de circulação e do transporte sedimentar para o canal principal do estuário do Mondego. Na legenda Emb, 5I, EE e Gala, representam os resultados obtidos referentes aos ciclos de maré determinados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos, Elevatória, e Gala. $TS_{enchente}$ e $TS_{vazante}$ representam os vectores da resultante do transporte sedimentar de fundo que se fez respectivamente para enchente e para vazante. Na figura, o comprimento dos vectores do $TS_{enchente}$ e do $TS_{vazante}$ reflectiram a multiplicação de factor de correcção pelo q_{sb}, de forma a serem bem observáveis no diagrama.

Este modelo conceptual confirma em parte os resultados obtidos pela Direcção Geral de Portos (1990) quando esta prevê que a resultante do transporte sedimentar neste braço se faz em direcção à foz, aquando de descargas do Mondego de $Q_{r,Mond}\approx100m^3/s$, de $Q_{r,Mond}\approx400m^3/s$ e de $Q_{r,Mond}\approx1000m^3/s$. Porém, estes regimes fluviais apenas representam quadros muito pontuais da variabilidade hidrodinâmica do canal principal do estuário do Mondego, e contraria por completo aquele pressuposto para caudais de estiagem de $Q_{r,Mond}\approx10m^3/s$ sob marés mortas e vivas.

O modelo de circulação e do transporte sedimentar de fundo, proposto para o braço sul determinou que na estação analisada, não foram definidos padrões de circulação e mistura, tal como, no canal principal. Não foram igualmente registados quadros de estratificação do tipo I, muito embora as relações de $(P/R)_{Gala}<0.25$. Estes resultados traduzem de uma forma indirecta a complexidade dos processos envolvidos na circulação e mistura neste canal periférico, pouco profundo e dominado pelos ambientes intermareais.

Quanto ao transporte sedimentar, o modelo conceptual proposto determina para a estação da Gala, que a resultante do transporte sedimentar de fundo se processa fundamentalmente segundo a vazante quando a magnitude dos volumes fluviais suplantaram os do prisma de maré. Para magnitudes de P/R>1 sugere um movimento de massa detrítica de fundo e sentido oposto, favorável à enchente.

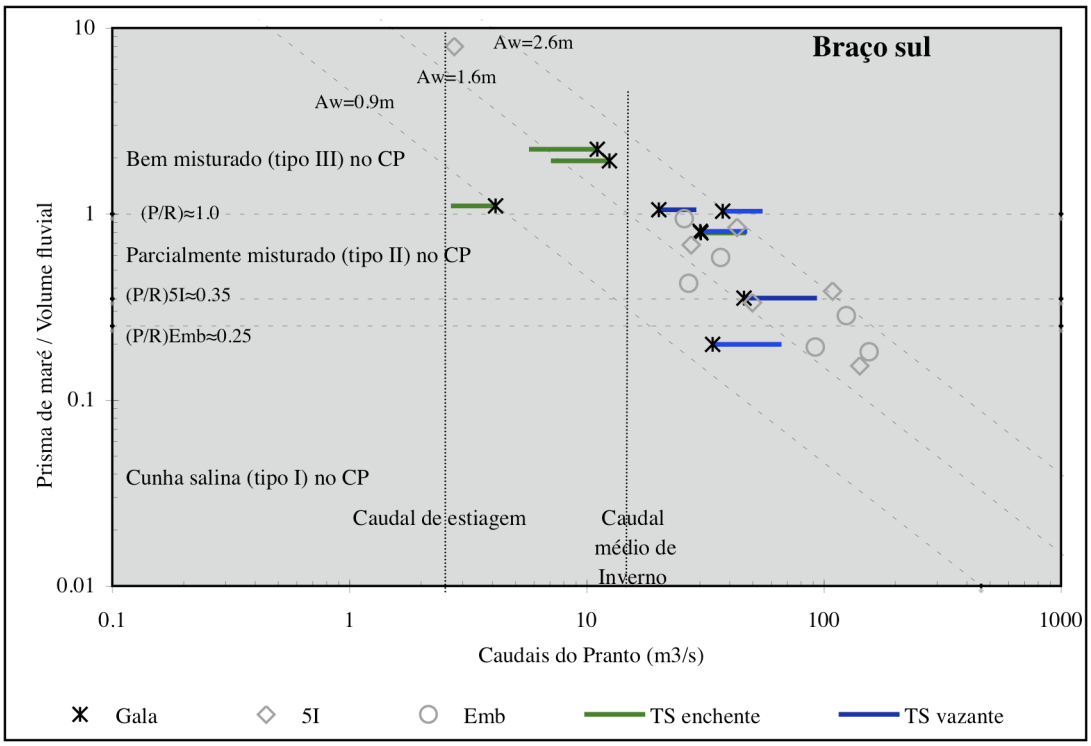


Figura 5.4. 7. Diagrama conceptual de circulação e do transporte sedimentar para o braço sul do estuário do Mondego. Na legenda Emb, 5I, EE e Gala, representam os resultados obtidos referentes aos ciclos de maré determinados nas estações da Embocadura, Cinco Irmãos, Elevatória, e Gala. $TS_{enchente}$ e $TS_{vazante}$ representam os vectores da resultante do transporte sedimentar de fundo que se fez respectivamente para enchente e para vazante. Na figura, o comprimento dos vectores do $TS_{enchente}$ e do $TS_{vazante}$ reflectiram a multiplicação de factor de correcção pelo q_{sb}, de forma a serem bem observáveis no diagrama.

Este comportamento em muito se assemelhou ao da estação dos Cincos Irmãos, tanto que ambas se enquadraram na zona de mistura, só que em canais distintos e com distâncias diferentes relativamente à foz, o que foi de encontro com a entrada preferencial da onda de maré pelo braço norte. Contudo, sendo o primeiro quadro o mais representativo da hidrodinâmica deste braço, os resultados obtidos apontam para que se continue a verificar uma tendência de assoreamento dos sectores médio-distal do braço sul com sedimentos de origem marinha (que são os que dominam o sector distal do braço sul).

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões Gerais

O presente trabalho teve por objectivo o estudo da hidrodinâmica e do transporte sedimentar de fundo no estuário do rio Mondego, através da caracterização dos processos de mistura, estratificação e circulação geral nos seus canais principais. Avaliaram-se os volumes de água e as taxas de transporte sedimentar de fundo, bem como, a sua variabilidade espaço-temporal. Estabeleceram-se relações entre a hidrodinâmica e o transporte sedimentar não coesivo de fundo e caracterizaram-se vários ambientes dinâmico-sedimentares. Avaliaram-se os impactes que as obras de regularização do braço norte tiveram na hidrodinâmica e na circulação dos sedimentos e elaboraram-se modelos conceptuais de circulação e do transporte sedimentar de fundo para o estuário. Para tal, efectuaram-se várias campanhas no estuário com a medição de parâmetros físicos, com a colheita de sedimentos, e medições do transporte sedimentar. Os dados obtidos foram processados no laboratório e sujeitos a tratamento matemático no qual se realça a análise harmónica, tendo-se destacado as seguintes conclusões.

Dimensões do Estuário

O estuário do Mondego corresponde a um sistema costeiro de pequenas dimensões, pouco profundo, definido por um comprimento longitudinal máximo que ronda os 28.5km, uma largura média de 260m e uma profundidade média de 2.5m. Expande-se por uma área aproximada de 8.5km^2 e é definido por um volume líquido médio de 21.3x10^{6}m^3. Em períodos de cheia ou de temporal, pode estender-se a uma área que pode rondar os 11.8km^2 e pode conter um volume de água nos seus canais que pode atingir os 42.2x10^{6}m^3.

Os ambientes permanentemente imersos representaram cerca de 42% da área inundável e um volume de 32% do volume total do estuário, enquanto os ambientes intermareais deste sistema representaram metade dos volumes em circulação, com 48%, tendo ocupado aproximadamente 51% da área do estuário. Os ambientes considerados supramareais, mas que foram esporadicamente,

total, ou parcialmente inundadas durante períodos de temporal ou episódios de cheia do Mondego, representaram volumes líquidos acrescidos da ordem dos 19.2% e estenderam-se apenas a uma área de 6.6% relativamente aos ambientes intermareais.

Regularização do Braço Norte

Com a regularização do braço norte, o canal principal passou a ser mais profundo, e a ser definido por uma secção recta do tipo trapezoidal composta por um leito menor e um maior, com um traçado longitudinal muito rectilíneo, e passou a apresentar uma fisiografia de continuidade entre a zona portuária e o troço de canal estuarino do Leito Regularizado do Baixo Mondego. Os ambientes intermareais passaram também a representar uma maior área, mas ficaram confinados aos fundos do leito maior, que marginavam o leito mais profundo daquele canal (o leito menor), e que se encontravam dispostos em cotas elevadas, acima dos ≈+2.2mZH, que só eram inundados durante a segunda metade das fase da enchente. Os ambientes intermareais compreendidos entre os +0.8mZH e os +2.2mZH, que outrora representavam 28% da área de todo o canal principal e eram representados por grandes barras transversais e marginais e áreas de sapal, deixaram de existir, passando agora a estar representados fundamentalmente pelas estreitas margens regularizadas do leito menor. Com esta nova fisiografia, a parte central do canal principal (correspondente ao leito menor) passou a corresponder à parte mais profunda daquele canal, e agora desprovida de obstáculos naturais.

Esta nova fisiografia terá tido como principais impactes na hidrodinâmica e no transporte sedimentar do canal principal, sob um decréscimo da capacidade de retenção de água nos ambientes intermareais durante as fases de maior altura da coluna de água, que são responsáveis por induzir uma tendência de decréscimo dos períodos de vazante, ao atrasar as preia-mares.

O traçado mais profundo, rectilíneo e desprovido de obstáculos naturais, terá contribuído para que as fases de enchente passassem a ser mais curtas e com velocidades de maior magnitude relativamente às de vazante, principalmente junto ao fundo, associadas a um decréscimo da

dissipação da energia da maré por atrito de fundo, favorecendo a sua entrada para o interior deste sistema, que necessariamente se reflectiu na entrada de sedimentos de origem marinha localizados no seu sector distal para o interior do estuário. Antes da execução dos trabalhos de regularização, o atrito de fundo era gerado quer pelo decréscimo gradual da batimetria para montante, quer pela obstrução exercida pelas formas de fundo e pelas zonas de sapal.

Aquando de regimes do Mondego elevados, este quadro hidrodinâmico e sedimentar inverte-se. Só que neste balanço de forças, o Mondego para além de apresentar um caudal muito irregular e pequeno na maior parte do ano, tem vindo a sofrer um decréscimo considerável na sua capacidade de transporte de sedimentos da bacia hidrográfica para o estuário, ficando estes represados a montante das inúmeras barragens e açudes. Estas, por sua vez também têm sido responsáveis pelo nivelamento da sazonalidade dos seus caudais, bem como, pelo amortecimento dos picos de cheia que em muito contribuem para a remoção de sedimentos para fora do estuário.

Com esta nova fisiografia, os ambientes intermareais do estuário definidos por barras e zonas de sapal passaram a restringir-se ao braço sul e a representar apenas 6.8% da área total do estuário.

Hidrodinâmica

A propagação da maré no estuário do Mondego aquando de baixos regimes fluviais pode ser definida como o resultado da interacção não linear com as suas características físicas e fisiográficas, nomeadamente da interacção do atrito de fundo nos canais principais, com as variações na sua largura e profundidade, ou entre outras características geométricas. Estas foram responsáveis quer por uma dissipação de energia da onda original, quer pela redução das amplitudes de cada componente gravítica, quer pela modificação das respectivas fases (da superfície livre e da velocidade), para os diferentes sectores do estuário. Aquando de caudais médios a elevados do Mondego, a distorção fluvial representou uma componente considerável na distorção da maré no canal principal.

A maré no estuário foi definida por um regime mesomareal, semi-diurno dominado por M_2, tendo sido M_4 a principal constituinte associada à propagação em ambientes pouco profundos a ser formada. No interior do estuário, a relação de amplitudes (M_4/M_2) reflectiu um aumento da magnitude da assimetria nas duas componentes da maré, consistente com a sua propagação quer em ambientes do estuário pouco profundos, quer de fisiografia variável. Esta propagação também foi descrita por variações da superfície livre muito simétricas nas duas fases da maré (com $(M_4/M_2)_\eta \approx 0.04$) no sector distal do canal principal, que apresentou um aumento da distorção para montante, tradutora de uma clara assimetria entre os tempos de subida e descida da maré. O mesmo se passou para a componente horizontal, que também apresentou um comportamento de variação directo e proporcional à variação das magnitudes da maré e dos caudais do Mondego, só que com uma maior relação de amplitudes $(M_4/M_2)_u \approx 0.16$. No braço sul a distorção $(M_4/M_2)_{\eta,Gala}$ apresentou-se fundamentalmente condicionada pela maré.

As relações de fases obtidas para a velocidade $(2M_2\text{-}M_4)_u$ descreveram para o canal principal um domínio da fase da enchente sob baixas descargas fluviais ($Q_{r,Emb} \leq 37 m^3/s$), e apontaram para uma tendência evolutiva de domínio da vazante sob caudais elevados do Mondego ($92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$). Estes domínios de uma das fases da maré também foram corroborados pelas tendências de variação definidas entre vários parâmetros maregráficos e a magnitude dos principais agentes de transporte nas estações em estudo. Definiram-se períodos de enchente tendencialmente mais curtos e velocidades de enchente de maior magnitude comparativamente às da vazante aquando de baixos regimes do Mondego, e períodos de vazante mais longos e velocidades de vazante mais elevadas aquando de descargas fluviais mais elevadas.

A maré apresentou um comportamento hipo-síncrono ao longo da embocadura e no braço norte, relacionado com uma dissipação de energia pelo atrito de fundo. No sector mais proximal do canal principal e no braço sul, a propagação da maré foi hipso-síncrona e fundamentalmente

controlada pelos fenómenos de convergência, consistentes com uma maior diminuição longitudinal da largura face à profundidade destes canais.

Na fase da preia-mar, os maiores atrasos registados entre a estofa da PM e a PM tiveram lugar junto ao fundo, tendo estes traduzido magnitudes positivas de $Ø_{PM,b}$ elevadas, cujas variações com os principais processos físicos de transporte em análise foram consentâneas com a acção do atrito de fundo. À superfície dos escoamentos, a estofa da PM apresentou um comportamento contrário, tendo ocorrido mais cedo que a PM em resultado da distorção imposta pelos caudais fluviais. Para marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_{w,Emb} \leq 2.6$m e sob baixos regimes fluviais, verificou-se que na estação da Embocadura, a propagação da maré apresentou um comportamento do tipo estacionário com uma pequena componente progressiva definida por distorções compreendidas entre os $7 \leq Ø_{PM,m} \leq 12°$ relacionada fundamentalmente com o atrito de fundo. Sob maiores regimes fluviais, da ordem dos $92 \leq Q_{r,Emb} \leq 155 m^3/s$, a maré passou a apresentar um tipo estacionário+progressivo+fluvial, apresentando distorções compreendidas entre os $2 \leq Ø_{BM,m} \leq 11°$. Na fase da BM exibiu um comportamento similar, mas com uma componente progressiva mais elevada, com magnitudes superiores.

Estas distorções foram reguladas quer pelo atrito de fundo, quer pela distorção fluvial, uma vez que a contribuição máxima estimada para a componente da distorção fluvial num ciclo de maré, foi de apenas 32% da distorção total de $Ø_{PM,E111193} \approx 3º$, e cerca de 26% de $Ø_{BM,E111193} \approx 42º$ aquando das descargas máximas registadas no Mondego, que foram na estação da Embocadura da ordem dos $Q_{r,E111193} \approx 155 m^3/s$. Os resultados obtidos permitiram associar as menores percentagens relativas da distorção fluvial intervenientes na $Ø_{m,Emb}$, com os caudais de menor magnitude, e *vice versa* para a componente da distorção referente ao atrito de fundo. A quantificação do peso relativo que a componente de natureza fluvial teve na distorção total da maré, teve por base a proposta de um novo modo de análise, fundamentado no registo e análise dos atrasos ocorridos entre as componentes vertical e horizontal da maré, na coluna de água.

A interpretação das curvas histeréticas dos vários ciclos de maré obtidas nas estações dos sectores médio-distal do estuário, revelaram que durante a fase da enchente, as velocidades de maior magnitude tiveram lugar após o nível médio da variação da superfície livre, enquanto durante a vazante a fase de aceleração dos escoamentos prolongou-se pouco após o nível médio da maré. Estes resultados demonstraram a grande facilidade com que a maré circula nestes canais com uma fisiografia do tipo trapezoidal completamente regularizada. O efeito distorcivo gerado nos escoamentos pelos extensos ambientes intermareais naturais que dominam os sectores médio-proximal do braço sul, traduziram-se na estação da Gala, com a ocorrência das velocidades de maior magnitude da vazante um pouco antes do nível médio da maré vertical. Este fenómeno foi consentâneo com o amortecimento causado nos escoamentos de vazante pelos extensos ambientes intermareais dos sectores médio-proximal, representados por barras e as zonas de sapal.

Prismas de Maré

Determinou-se que sob baixos regimes fluviais, os volumes de enchente e de vazante em circulação no canal principal do estuário apresentaram magnitudes superiores aos registados no braço sul. Aquando de regimes do Mondego mais elevados ($Q_{r,Emb} \geq 124 m^3/s$) e sob marés de $A_{w,Emb} \geq 2.1m$, as magnitudes dos volumes de enchente do braço sul passaram a ser superiores aos volumes que se propagaram pelo canal principal do estuário, na Embocadura, indiciando quer o amortecimento causado nos escoamentos de enchente pelas descargas fluviais, quer a circulação dos caudais do Mondego apenas pelo braço norte do estuário.

Os prismas de maré aferidos nos diferentes sectores do estuário descreveram variações directas e proporcionais com a amplitude da maré. Sob caudais do Mondego de maior magnitude, os $P_{Emb,92 \leq Qr \leq 155 m^3/s}$ passaram a descrever tendências de decréscimo proporcionais a Q_r mesmo sob marés de maior amplitude. Nas marés mortas destes quadros, os P_{CP} apresentaram magnitudes pouco superiores às dos P_{BS}, invertendo-se esta tendência com o aumento dos caudais do Mondego.

Os dois braços do estuário apresentaram comportamentos distintos na propagação da maré, que se relacionaram fundamentalmente, com as diferenças fisiográficas apresentadas e com as drenagens independentes e com magnitudes discrepantes observadas entre o Mondego e o Pranto. A fisiografia do canal principal muito antropizada, com um desenvolvimento longitudinal muito rectilíneo e no seguimento longitudinal da foz do estuário, terá propiciado a entrada e a saída de maiores volumes de água durante as fases da enchente e da vazante em cada ciclo de maré.

Mistura, Estratificação e Transporte Sedimentar

Os diagramas de estratificação-circulação propostos para os dois braços do estuário permitiram caracterizar os vários quadros hidrodinâmicos, tendo por base a competição ocorrida entre os principais agentes intervenientes nos processos de mistura e circulação estuarina. A análise destes modelos conceptuais, para além de demonstrar comportamentos hidrodinâmicos distintos entre os dois canais do estuário, apontou para que os processos de mistura se encontrem fundamentalmente regulados pela maré, face à fisiografia do estuário, e aos reduzidos caudais fluviais médios anuais em circulação. Permitiu delinear para o canal principal, que o domínio bem misturado (do tipo III) foi caracterizado por relações de P/R>1, definindo um regime hidrodinâmico dominado pela maré, cujas condições de turbulência se sobrepuseram à estratificação por densidade. O quadro de mistura do tipo I, enquadrou-se para valores de $(P/R)_{Emb}<0.25$ na estação da Embocadura, e para valores dos $(P/R)_{5I}<0.35$ na estação dos Cinco Irmãos, definindo quadros muito estratificados de densidade (com $n_s>1$) e uma mistura muito pequena ($R_{i,E}>0.8$), com uma cunha salina de fundo de origem marinha, e uma hidrodinâmica dominada pelas descargas do Mondego. O domínio do tipo II (parcialmente misturado), enquadrou-se em relações de $0.25<(P/R)_{Emb}<1$ e definiu um quadro de mistura e estratificação intermédio relativamente ao descrito nos dois domínios anteriores. Permitiu igualmente definir, que para marés médias de $A_{w,CP}\approx1.6$m, o quadro de mistura do tipo I teve lugar no estuário sob descargas do Mondego da ordem dos $Q_{r,Emb}>80m^3/s$, enquanto o do tipo II ocorreu sob descargas compreendidas entre os $20<Q_{r,Emb}<80m^3/s$. Para

descargas fluviais da ordem dos $Q_{r,Emb}<20m^3/s$ ocorre o tipo III. No braço sul registaram-se apenas os quadros do tipo II e III, não tendo sido possível contudo, definir qualquer padrão de circulação, mistura e estratificação, dada a complexidade dos processos ali decorrentes, neste canal de maré, pouco profundo, periférico, e dominado pelos ambientes intermareais nos sectores médio-proximal.

Verificou-se também que a estação da embocadura se enquadrou no domínio marinho do estuário, a estação dos Cinco Irmãos na zona de mistura e a Elevatória no domínio fluvial. A hidrodinâmica destas estações, foi dominada pelos processos marinhos na primeira, enquanto os processos fluviais regularam a estação Elevatória, e ter-se-á verificado um balanço desses processos na estação dos Cinco Irmãos.

Constatou-se também que a estratificação na zona de mistura do estuário encontrou-se primeiramente regulada pela salinidade.

Foi proposto um modelo conceptual de dinâmica e do transporte sedimentar, que para além ter relacionado as magnitudes dos principais agentes de transporte, com os domínios de circulação e de mistura nos dois braços do estuário, permitiu também relacionar os caudais sólidos de fundo residuais de cada ciclo de maré. Este modelo mostrou havido uma concordância, entre os domínios de mistura e circulação definidos para as três estações do canal principal, e o transporte sedimentar residual de fundo. Foram estabelecidos para relações aproximadas de $P/R<0.25$, regimes do tipo I e transportes sedimentares de fundo residuais que se fizeram no sentido da vazante. Para quadros de mistura, circulação e estratificação do tipo bem misturado, com $P/R>1$, a resultante do transporte sedimentar de fundo na Embocadura e nos Cinco Irmãos efectuou-se segundo a enchente. Para razões de $0.25<P/R<1$ definiram-se regimes parcialmente misturados do tipo II, que para a estação da Embocadura localizada no domínio marinho do estuário, representou um transporte sedimentar de fundo residual segundo o sentido da enchente. Porém, na estação dos Cinco Irmãos, localizada na zona de mistura, a resultante do transporte sedimentar inverteu-se e passou a fazer-se em direcção à foz. Sendo estes dois últimos quadros os mais frequentes na hidrodinâmica do canal

principal, estes resultados apontam para que se continue a verificar uma tendência de assoreamento do sector portuário com sedimentos de proveniência marinha, mas também que este assoreamento se estenda ao longo do braço norte.

Na estação do braço sul, não se definiram padrões de circulação e mistura tal como no canal principal, assim como, não foram registados quadros de estratificação do tipo I na estação da Gala, muito embora as relações de P/R<0.25. Estas, definiram apenas quadros parcialmente misturados que foram contrastantes com os quadros muito estratificados de tipo I do canal principal. Estes resultados apontam para que a complexidade dos processos reguladores da circulação e mistura neste canal periférico, pouco profundo e dominado pelos ambientes intermareais, estejam muito relacionados com as suas peculiaridades fisiográficas. No que diz respeito ao transporte sedimentar, o modelo conceptual demonstrou que na Gala a resultante do transporte sedimentar de fundo se fez segundo a vazante quando a magnitude dos volumes fluviais suplantou o volume do prisma de maré, e fez-se preferencialmente segundo a enchente quando P/R>1. Este comportamento em muito se assemelhou ao da estação dos Cincos Irmãos, tanto que ambas se enquadraram na zona de mistura, só que em canais distintos e com distâncias diferentes relativamente à foz, o que vai de encontro com a entrada preferencial da onda de maré pelo braço norte. Todavia, sendo o primeiro quadro o mais representativo da hidrodinâmica deste braço, os resultados obtidos com este modelo, sugerem que se continue a verificar uma tendência de assoreamento dos sectores médio-distal do braço sul com sedimentos de proveniência marinha.

Na estações em estudo, foi na Gala que se registaram os maiores volumes de sedimento em circulação nas diferentes fases da maré, bem como, os maiores transpores residuais de sedimento por ciclo de maré. Os maiores volumes de sedimento registados em transporte, aconteceram quer sob descargas muito elevadas do Pranto, quer sob marés vivas. Muito embora a hidrodinâmica deste braço tenha sido inferior à do canal principal, a localização da estação da Gala num sector com fundos cobertos com grandes estruturas sedimentares que conferiram elevadas rugosidades

hidráulicas e tensões de corte de fundo, mas também a grande disponibilidade de sedimentos a montante e a jusante desta estação, fundamentam estes resultados. Também contribuiu o efeito de convergência gerado na estação da Gala e que foi responsável pelo aumento da velocidade dos escoamentos de vazante (em especial durante as maré vivas), e que resultou do afunilamento da secção do canal. Este fenómeno, quando conciliado com o efeito de represamento de água nos extensos ambientes intermareais naturais localizados nos domínios médio-proximal do braço sul, justificaram a ocorrência na estação da Gala de vazantes mais longas, com velocidades mais elevadas relativamente às da enchente, e consequentemente ter-se considerado um domínio da vazante nesta estação.

Propôs-se também um modelo conceptual que relacionou os tempos de residência da massa de água doce em quatro sectores do estuário, com a magnitude dos principais agentes hidrodinâmicos. Permitiu estabelecer quadros hidrodinâmicos favoráveis à remoção ou à retenção da carga poluente dissolvida (conservativa) em circulação nas estações da Embocadura, Gala, e Cinco Irmãos. Este diagrama indicou que para marés compreendidas entre os $0.9 \leq A_w \leq 2.6$m e descargas fluviais inferiores a $Q_{r,Mond} \leq 155 m^3/s$ para o Mondego e inferiores a $Q_{r,Mond} \leq 46 m^3/s$ para o caso do rio Pranto, os Tempos de residência determinados para a estação da Embocadura, foram da ordem dos $2.2 \leq T_{r,Emb} \leq 2.9$ ciclos de maré, para a estação dos Cinco Irmãos foram entre os $2.1 \leq T_{r,5I} \leq 8.7$ ciclos de maré, e para a estação da Gala foram compreendidos entre os $2.2 \leq T_{r,Gala} \leq 4$ ciclos de maré. Para as mesmas condições de P/R verificou-se que os menores tempos de residência se localizaram na estação da Embocadura, que terá sido consentâneo com a grande proximidade desta estação à foz do estuário. Foram também relacionados os maiores valores de T_r com as menores descargas fluviais, assim como, com as marés de menor amplitude.

6.2. Importância dos Resultados Obtidos

Este trabalho permite, determinar as zonas propícias ao assoreamento quer entre a Embocadura e os Cinco Irmãos, quer entre a Embocadura e a Gala, como também fundamentar as

suas implicações na navegabilidade local, ao fornecer elementos imprescindíveis para uma melhor gestão dos inevitáveis e dispendiosos trabalhos de dragagem na zona portuária.

Poderá igualmente fornecer bases para o estabelecimento de zonas menos propícias para o lançamento de resíduos urbanos ou industriais no sistema estuarino, tendo por base os tempos de residência calculados. Pode ainda contribuir para uma melhor gestão integrada das águas de transição com as águas interiores e costeiras confinantes, afim de não só preservar e recuperar as espécies aquáticas e ribeirinhas protegidas e os respectivos habitats (caudais ecológicos), mas também ao sugerir caudais do Mondego mínimos que garantam determinados quadros de mistura, de circulação e de transporte sedimentar no estuário (caudais de circulação). Estes também salvaguardam os anteriores dada a relação biunívoca entre muitos dos organismos estuarinos e os processos envolvidos em estudo.

Para além de fornecer à comunidade científica um conjunto de resultados experimentais inéditos de campo, sedimentológicos, hidrodinâmicos e relativos ao transporte sedimentar de fundo do estuário do Mondego, e referentes a um determinado período de tempo, poderá permitir estudos comparativos com trabalhos mais recentes ou futuros, bem como, serem melhor avaliados os impactes de outras obras portuárias no estuário. Também poderá passar a constituir uma base de dados de um sistema estuarino pouco profundo, não estratificado e de reduzidas dimensões, permitindo estudos comparativos com outros sistemas estuarinos.

Este trabalho, poderá ainda permitir a elaboração e/ou calibração de modelos hidrodinâmicos e sedimentares numéricos sobre o estuário ou de outros com características fisiográficas e hidrodinâmicas semelhantes, bem como, quando convertido num formato SIG transformar-se numa ferramenta de análise e de compilação, quer de informação histórica do estuário do Mondego, quer de contributos mais recentes não só nas áreas da hidrodinâmica e do transporte sedimentar, mas também de outras áreas do conhecimento.

Realça-se por fim, o carácter interdisciplinar apresentado por este trabalho, que para além de ter sido desenvolvido em parceria com outras áreas do conhecimento[1], os resultados obtidos permitiram uma melhor integração da informação de base já produzida no estuário, tanto que os processos envolvidos na hidrodinâmica e no transporte sedimentar no estuário, também servem de suporte a estudos de natureza hidráulica, química, geológica, biológica e ambiental.

6.3. Trabalhos Futuros

Consideram-se relevantes vários trabalhos a ser desenvolvidos no futuro, que passam designadamente pela continuação da análise da informação de campo obtida no estuário e já processada laboratorialmente, mas que ainda não foi processada e integrada nos modelos de circulação desenvolvidos no âmbito deste trabalho. Esta, abrange um leque de informação de natureza sedimentar, morfosedimentar, relativa ao transporte sedimentar e referente a múltiplos parâmetros físicos, que se encontram ainda por interpretar, possibilitando a realização de trabalhos futuros, que poderiam passar por:

- estudo pormenorizado da variação espaço-temporal das características petrográficas dos sedimentos que cobrem o fundo do estuário;

- análise petrográfica apenas da fracção detrítica em transporte no estuário e estabelecimento de eventuais padrões de proveniência;

- análise da informação referente à variação de pH, Eh, e teores em oxigénio, e seu enquadramento na dinâmica do estuário;

- quantificação do transporte sedimentar em regime de suspensão e sua integração no modelo conceptual de circulação do estuário;

- estudo comparativo entre o transporte sedimentar medido no estuário com o estimado com recurso a modelos teórico-empíricos.

[1]. Trabalho efectuado no âmbito do projecto "lançamento de Bases para o Estudo Integrado para o Estudo do Estuário do Mondego"

Considera-se da maior importância o desenvolvimento do modelo de dinâmica e do transporte sedimentar proposto, no sentido de este permitir fazer estimativas do transporte sedimentar de fundo ao longo do tempo, e não à escala do ciclo de maré, abrangendo períodos de vários anos. Também se reveste da maior importância, incorporar neste modelo, a componente do transporte sedimentar em regime de suspensão.

Torna-se também da maior relevância prosseguir com novas investigações no estuário, quer com o planeamento de novas campanhas de campo com o registo de dados hidrodinâmicos e relativos ao transporte sedimentar, com a finalidade de avaliar a sua evolução recente, mas também para dar resposta aos problemas e limitações levantados neste trabalho.

Reveste-se também da maior importância, desenvolver estudos similares aos efectuados no Mondego noutros estuários portugueses, com características semelhantes, a fim de comparar funcionamentos hidrodinâmicos e sedimentares e conferir um carácter mais global a este trabalho.

Referencias Bibliográficas

Abecasis, F. & Matias, M. F. (1973) *Bol. Inform. Lab. E. A.*, 11, 131, 803-835.

Abecasis, F. M. (1958) *Lab. Nac. Eng. Civil, Mém.* 140, 10p. **Abecasis, F. & Matias, M. F. (1973)** *Bol. Inform. Lab. E. A.*, 11, 131, 803-835.

Abecasis, F.; Matias, M. F.; carvalho, J. J. R. & Vera-Cruz, D. (1962) *Lab. Nac. Eng. Civil, Tecn. paper*, 186, 25p.

Abecassis, F. & Matias, M. F. (1973) Transporte sólido litoral. Sua influência nas embocaduras, Praias e restingas. Obras correlatas. *Bol. Inform.* 11 (131), pp. 803-835.

Abecassis, F.; Matias, M. F.; Carvalho, J. J. R. & Vera-Cruz, D. (1962) Methods of determining sand-and-silt movement along the coast, in estuaries and in maritime rivers. *Lab. Nac. Eng. Civil. Technical paper*, nº 186.

Alexander, J.; Bridge, J. S.; Cheel, R. J. & Leclair, S. F. (2001) Bedforms and associated sedimentary structures formed under supercritical water flows over aggrading sand beds. *Sedimentology*, Vol 48, Iss 1, pp 133-152.

Allen, F. A. (1997) *Earth surfaces processes*. Ed. Blackwell Science Ltd Chanson. Oxford. 404p.

Allen, J. R. L. (1992) *Principles of physical sedimentology*. Published by Chapman & Hall, London, 271p.

Allen, J. R.; Bauer, B. O.; Psuty, N. P. & Carter, R. W. G. (1991) Process variation across a barred, tidal nearshore. *in*: *Coastal Sediments´91*, vol.1, eds. Kraus, N. C.; Gingerich, K. J. & Kriebel, D. L., American Society of Civil Engineers, New York, pp.498-511.

Almeida, A. C.; Soares, A. F.; Cunha, L. & Marques, J. F. (1990) Proémio ao estudo do Baixo Mondego, *BIBLOS*, Vol. LXVI, pp. 1-47.

Almeida, J. P. L. (1992) Relatório de actividades. Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego" - Caracterização do clima de agitação marítima na zona de entrada do Porto da Figueira da Foz.

Almeida, J. P. P. G. L. (1991) A onda de maré; geração, propagação, caracterização, modelação. O caso do estuário do Mondego. Relatório da aula apresentada no âmbito da realização das "*Provas deaptidão pedagógica e capacidade científica*" previstas no "Estatuto da carreira universitária", F.C.T.U.C. Universidade de Coimbra.

Alves, A. M. C. (1992) A agitação marítima na costa noroeste de Portugal e a formação de uma praia em Ponta e assoreamento da barra do rio Minho por efeito da Insua de Caminha. *Geonovas*: A Geologia E O Ambiente. Número Especial 1, Lisboa.

Alves, M. H. & Bernardo, J. M. (2002) Determinação de caudais ecológicos. INAG, DSP, 2002, pp. 3.1 a 3.27, Lisboa.

Andreae, M. O. (1982) Arsenic and mercury in the estuarine environment. *Estuarine Processes: An aplication to the Tagus estuary*, Proceedings of a UNESCO/IOC/CNA, Lisboa, Portugal, pp.137-154.

Aubrey, D. G. (1986) Hydrodinamic controls on sediment transport in well-mixed bays and estuaries. In: *Physics of Shallow Estuaries and Bays, Coastal and Estuarine Studies*, 16. Ed. J. Van de Kreeke. Springer-Verlag, New York.

Aubrey, D. J. & Speer, P. E. (1985) A study of non-linear propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part 1: observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, pp.185-205.

Bagnold, R. A. (1968) Deposition in the process of hydraulic transport. *Sedimentology*, vol.10, pp.45-56.

Bansch, E. & Deckelnick, K. (1999) Optimal error estimates for the Stokes and Navier-Stokes equations with slip-boundary condition. Rairo-*Mathematical Modelling and Numerical Analysis-Modelisation Mathematique et Analyse Numerique*, Vol 33, Iss 5, pp 923-938.

Baptista, A. I. L.; Duarte, D. N. R.; Santos, F. J. S.; Marques, J. C. S. & Lourenço, L. M. N. (1995) *Estudo da Vulnerabilidade da Caparidade de Recepção das Águas e Zonas*

Costeiras em Portugal (Estuário do Mondego). Instituto do Mar, Departamento de Engenharia Civil, Faculade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra,195p.

Baptista, A. M. (1988) 2º Relatório de Progresso. Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego". *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*.

Baptista, A. M.; Boone, D.; Fish, W.; Turner, P. J.; Barros, A. P.; Remédio, J. M. & Wood, T (1990) Estudo das marés e circulação hidrodinâmica. *Relatório de Progresso*. Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego", Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Beard, A. G.; Mitchell, N. J.; Williams, P. J. S. & Kunitake, M. (1999) Non-linear interactions between tides and planetary waves resulting in periodic tidal variability. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, Vol 61, Iss 5, pp 363-376.

Bethea, R. M.; Duran, B. S. & Boullion, T. (1995) *Statistical methods for engineers and scientist*. Third edition. Revised and expaned, ed. D.B. Owen & W. R. Schucany. Marcel Dekker, Inc. N.W., 635p.

Bettencourt, M. L. (1979) Erosão hídrica na Bacia do Mondego. *Rev. Inst. Nac. Met. Geof.*, vol.2 nº 1/2.

Blantnon, J. O. & Ferrerira, M. A. (2000) Effect of a broad shallow sill on a tidal circulation and salt transport in the entrance to a coastal plain estuary (Mira – Vila Nova de Milfontes, Portugal). *Estuaries*, vol. 23, no. 3, pp.293-304.

Blanton, J. O. & Andrade, F. A. (2001) Distirtion of tidal currents and the lateral transfer of salt in a shallow coastal plain estuary (o estuário do Mira – Portugal). *Estuaries*, vol. 24, nº3, pp.467-480.

Blanton, J. O.; Andrade, F. A. & Ferrerira, M. A. (2000) Effect of a broad shallow sill on tidal circulation and salt transport in the entrance to a coast plain estuary (Mira-Vila Nova de Mil Fontes, Portugal). *Estuaries*, vol. 23, no 3, pp.293-304.

Blanton, J. O.; Lin, G. & Elston, S. A. (2002) Tidal current asymetry in shallow estuaries and tidal creeks. Continental shelf research, 22, pp. 1731-1743

Boer, P. L.; Oost, A. P. & Visser, M. J. (1989) The diurnal inequality of the tide as a parameter recognizing tidal influences. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol.59, nº 6, pp.912-921.

Borrego, J.; Morales, J. A. & Pendon, J. G. (1995) Holocene estuarine facies along the mesotidal coast of Huelva, south-western Spain. In *Tidal Signatures in Modern and ancient sediments*. Special Publication nº24 of the International Association of Sedimenttologists. Ed. B. W. Flemming and A. Bartholomä, Brackwell Science Ltd, Oxford. pp.151-170.

Bowden, K, F. (1978) Mixing processes in estuaries. *In* Kjerfve, B. (ed.) Estuarine transport processes. University of South Carolina, pp. 11-36.

Brown, J.; Colling, A.; Park, D.; Phillips, J.; Rothery, D. & Wright, J. (1991) *Waves, tides and shallow-water processes*. Ed.Gerry Bearman, Pergamon Press, 187 p.

Burton, J. D. (1982) Speciation of heavy metals. *Estuarine Processes: An aplication to the Tagus estuary*, Proceedings of a UNESCO/IOC/CNA , Lisboa, Portugal, pp.181-191.

Caçador, M. I.; Vale, C. & Catarino, F. M. (1993) Effects of plants on the accumulation of Zn, Pb, and Cd in sediments of the Tagus estuary salt marshes, Portugal. in: *Studies in Environmental Science 55-Environmental Contaminations*, ed. J.P. Vernet, Elsevier Science Publishers, B.V., Amesterdam, pp.355-364.

Caetano, L. (1989) A promoção pública de solo industrial na sub-região do baixo Mondego. *Cadernos de Geografia*, Coimbra, Inst. Est. Geog., nº8, pp.11-38

Cameron, W. M. & Prichard, D. W. (1963) Estuaries. In: M. N. (ed). *The sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas*. News York, Interscience, pp.306-324.

Carbonneau, P. E. & Bergeron, N. E. (2000) The effect of bedload transport on mean and turbulent flow properties. *Geomorphology*, Vol.35, Iss.3-4, pp.267-278.

Carter, R. W. G. (1989) Tidal anda lake coasts. *in*: *Coastal environmets - An introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines*, chapter 4, Environmental Science, University of Ulster, Coleraine Co. Derry BT 52 1SA, Northern Island. Academic press, pp.151-198.

Carvalho, J. J. R. & Marcelo, J. P. (1966) Agitação marítima na costa oeste de Portugal Metropolitano-contribuição para o seu estudo. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Memória 290.

Carver, R. E. (1971) *Procedures in sedimentary petrology*. John Wiley & Sons, New York, 653p.

Castro, P. & Freitas, H. (2002) Nitrogen dynamics in the Mondego estuary; leaf senescence and N mobilization in spartina maritima, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Chacin, J. M. & Cantwell, B. J. (2000) Dynamics of a low Reynolds number turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 404, pp 87-115.

Chanson, H. (2004) The hydraulics of open channel flow: an introduction. Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures. Second edition. Elsevier Butterworth Heinmann. 585p.

Chant, R. J. & Wilson, R. E. (2000) Internal hydraulics and mixing in a highly stratified estuary. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, Vol 105, Iss C6, pp.14215-14222.

Chapalain, G. & Thais, L. (2000) Tide, turbulence and suspended sediment modelling in the eastern English Channel, *Coastal Engineering*, vol.41, nº1-3, pp.295-316.

Chauvet, P. (1992) Traitement des données à support spatial: la géostatistique et ses usages. *Rapport du CG N-28/92/G, Ecole des Mines de Paris*, 40pp.

Chi-Fang, W, Ming-Hsi Hsu & Kuo, A. Y. (2004) Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 60, Issue 3, July 2004, Pages 381-393*.

Cristina, G.; Alveirinho, J. M.; Ferreira, O. & Taborda, R. (1994) Analysis of storm surge in Portugal between June 1986-and May 1988. In Littoral 94, September 26-29 Lisbon-Portugal, pp. 382-387.

Cudaback, C. N. & Jay, D. A. (2000) Tidal asymmetry in an estuarine pycnocline: Depth and thickness. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, Vol 105, Iss C11, pp 26237-26251.

Cunha, P. P. & Dinis, J. (2000) O estuário do Mondego no plano de bacia hidrográfica- aspectos sedimentares e ambientais. *in Os estuários de Portugal e os planos de bacia hidrográfica. Associação Eurocoast – Portugal*, pp.35-43.

Cunha, P. P. & Dinis, J. (2002) Sedimentary dynamics of the Mondego estuary, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific Ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Cunha, P. P; Pinto, J. & Dinis, J. L. (1995) Unidades fisiográficas e modificações recentes no estuário do Mondego, por análise de coberturas de fotografia aérea. Resumos alargados, IV Congresso Nacional de Geologia, *Menórias Fac.Ciên. Universidade do Porto*, nº4, pp.405-409.

Darbyshire, E. J. & West, J. R. (1992) Turbulence and shear induced mixing processes in estuaries. *in Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol 40, Cap.5, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp. 75-99.

Davies, A. G.; van Rijn, L. C.; Damgaard, J. S.; van de Graaff, J. & Ribberink, J. S. (2002) Intercomparison of research and pratical sand transport models. *Coastal Engineering*, Vol.46, pp.1-23.

Davies, J. L. (1964) A morphogenetic approach to world shorelines. *Z. Geomorphol*. 8, pp. 27-42.

Davis, R. A. & Hayes, M. O. (1984) What is a wave-dominated coast?. *Marine Geology*, 60: pp.313-329.

Day, J. W. Jr.; Hall, C.A.S.; Kemp, W. M. & Arancibia, A. Y. (1989) Estuarine geomorphology and physical oceanography, Cap.2. *Estuarine ecology*, pp.47-75.

Dean, R.G. & Dalrymple, R. A. (1991) Water wave mechanics for engineers and scientists. W*orld Scientific, Singapore*.

Dias, J. M. A. & Taborda, R. (1988) Evolução recente do nível médio do mar em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico,* Nº 9.

Dias, J. M. A. (1990) A evolução actual do litoral português. *Geonovas*, 11, pp. 15-29.

Dias, J. M.; Granja, A. P.; Lopes, J. F. & Dekeyser, I. (1988) Circulação residual provocada pela acção do vento na Ria de Aveiro. *1º Simpósio de meteorologia da APMG 2º encontro luso-espanhol de meteorologia*, Lagos, Portugal – 23-25 de Novembro, pp. 171-218.

Dias, J. M.; Lopes, J. F. & Dekeser, J. (1996) Simulação da circulação forçada pela acção da maré e do vento na Ria de Aveiro. *Seminário sobre lagunas costeiras e ilhas-barreira da zona costeira de Portugal. Eurocoast Portugal*, pp. 169-179.

Dias, J. M.; Lopes, J. F.; Granja, A. P. & Dekeyser, I. (2000) Residual circulation in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal. *Proceedings of the fourth international conference on hydrodynamics*/ Yokohama /7-9 September, pp.821-826.

Dinis, J. & Cunha, P. P. (1998) Impactes antrópicos no sistema sedimentar do Estuário do Mondego. *Sociedade e Território, revista de estudos urbanos e regionais*. Edições Afrontamento, Porto, pp.47-59.

Dinis, P. A. H. D. M. (1994) Impactes antrópicos sobre a dinâmica sedimentar no Baixo Mondego. Trabalho realizado no âmbito do curso de *mestrado em Geociências*. Avaliação de impactes.

Dippner, J. W. (1987) An eddy-resolving model for river plume fronts. *in*: *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Ed. by J.C.J.Nihoul and B.M.Jamart. Elsevier Sience publichers B.V.

Direcção Geral de Portos (1988) Levantamento batimétrico do braço sul do Rio Mondego. Escala 1:2000. Direcção dos Serviços de fisiografia, Figueira da Foz. Efectuado pela B.H.2. em Novembro de 1987.

Direcção Geral de Portos (1990) *Estudo de Impacte Ambiental*. Regularização da Zona Estuarina de Transição entre o Porto da Figueira da Foz e o troço Terminal de Regularização do Baixo Mondego. *Consulmar - Consultores para Estruturas e Instalações Portuárias, Lda*..

Direcção Geral de Portos (1991) Levantamento batimétrico do Rio Mondego entre o Porto da Figueira da Foz e os Cinco Irmãos. Escala 1:2000. Direcção dos Serviços de fisiografia, Figueira da Foz. Efectuado pela B.H.2, da D.C.M.E. em Novembro de 1991.

Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (1976) Planta da Regularização do Baixo Mondego, leito central (troço do compreendido entre os Cinco Irmãos e a ponte de Formoselha). Actualização do traçado de acordo com a definição analítica de Junho de 1982. Cartas nº1 a nº10. Escala 1:2000. Levantamento efectuado por Hidroprojecto, Consultores de Hidráulica e Salubridade, SARL.

Direcção-Geral de Portos, Navegação e Transportes Marítimos (1995) Levantamento batimétrico do Rio Mondego entre o Porto da Figueira da Foz e os Cinco Irmãos. Escala 1:2000. Direcção de Serviços dos Assuntos Portuários. Efectuado pela B.H.2, da D.C.M.E. em Novembro/Dezembro de 1995.

Direcção-Geral dos Recursos Naturais (1968) *Aproveitamento hidráulico do Vale do Mondego*. Direcção-Geral dos Recursos Naturais (Ed.), Lisboa.

Direcção-Geral dos Recursos Naturais (1988) *Aproveitamento hidráulico do Vale do Mondego*. Direcção-Geral dos Recursos Naturais (Ed.), Lisboa.

Douglas, D. J. (1946) Interpretation of the results of mechanical analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol.16, pp.19-40.

Draper, N. R. & Smith, H. (1998) *Applied regression analysis*. Third edition. John Wiley & Sons, Inc, N.W., 697p.

Dronkers, J (1986) Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20, pp.117-131.

Duarte, A. S.; Pinho, J.; Pardal, M. Â.; Neto, J. M.; Vieira, J. & Santos, F. S. (2002) Hydrodynamic modelling for Mondego estuary water quality management, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Duarte, D. N. R. & Reis, R. P. B. P. (1991a) Transporte e distribuição anual de sedimentos infratidais no estuário do Mondego. Comunicação III Congresso Nacional de Geologia. Coimbra.

Duarte, D. N. R. & Reis, R. P. B. P. (1991b) Distribuição actual de sedimentos no estuário do Mondego, Simpósio "A Plataforma Continental Portuguesa", *Gaia*, 3, Dezembro. Lisboa.

Duarte, D. N. R. & Reis, R. P. B. P. (1992) Estudo preliminar da evolução da linha de costa adjacente à embocadura do estuário do Mondego entre 1801 e 1989. Estimação de taxas de acreção e erosão costeiras, *Actas III Congresso Geológico de Espanha*, tomo 2, pp.146-150.

Duarte, D. N. R. & Reis, R. P. B. P. (1993) Contribuição para a caracterização hidrodinâmica do estuário do rio Mondego. *Comunicação III Reunião do Quaternário Ibérico*. Coimbra.

Duarte, D. N. R. & Reis, R. P. B. P. (1994) Impact on sedimentary dynamic of the Mondego estuary of regularization works on the north channel (Portugal). *Symposium Northern and Southern European Estuaries and Coastal Areas*. E.C.S.A. 24. Aveiro.

Duarte, D. N. R. (1989) Caracterização dos sedimentos do estuário do Mondego. *Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego", Relatório de Actividades,* Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Duarte, D. N. R. (1994) Sediment and hydrodynamic approach of the Mondego estuary (Portugal). *Symposium ECSA 24 Northern and Southern European Estuaries and Coastal Areas. Abstracts Poster Presentations*. Aveiro, Setembro, p.72.

Duarte, D. N. R. (2000) *Transporte de sedimentos não coesivos sob correntes unidireccionais permanentes, em canais abertos*. Provas de Aptidão Pedagógica e de Capacidade Científica. Universidade do Algarve, UCTRA, 11p.

Duarte, D. N. R.; Blanton, J. O.; Boski, T. & Dias, J. M. A. (2000) Estudo da Propagação não Linear da Maré no Estuário do Mondego (Portugal), com base na componente M4/ A Study of non-linear Tidal Propagation in the Mondego Estuary (Portugal), based in the M4 Component. *3º Simpósio sobre a Margem Continental Ibérica Atlântica*. pp31-32, Faro.

Duarte, D. N. R.; Dinis, J. M. L. & Pena dos Reis, R. P. B. (1991) Distribuição dos minerais de argila em sedimentos actuais do estuário do Mondego, Seminário "A zona costeira e os problemas ambientais", *EUROCOAST*, Aveiro.

Dyer, K. R. & Manning, A. J. (1999) Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. *Journal of Sea Research*, vol. 41: 1-2, pp.87-95.

Dyer, K. R. & Taylor, P. A. (1973) A simple, segment prism model of tidal mixing in weel-mixed estuaries. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 1, pp.411-418.

Dyer, K. R. (1979) Estuaries and estuarine sedimentation. *Estuarine hydrography and sedimentation*, Ed. K.R. Dyer, Institute of Oceanographic Sciences Taunton, publ. by the Syndics of thr Cambridge University Press, England.Cap.1, pp.1-18.

Dyer, K. R. (1980) Velocity profiles over a rippled bed and the treshold of the movement of sand. *Estuar. Coastal Mar. Sci.*, Vol.10, pp.181-199.

Dyer, K. R. (1986) *Coastal and estuarine sediment dynamics*. A Wiley-Interscience Publication, (ed.) by Jonh Wiley & Sons Ltd., New York, 342p.

Dyer, K. R. (1997) *Estuaries*. A physical introduction. 2nd edition, ed. Keith R. Dyer,. John Wiley & Sons, 195p.

Einstein, H. A. (1950) The bedload function for sediment transportation in open channel flows. *Soil Cons. Serv. U. S. Dep. Agric. Tech. Bull.*, nº1026, 78p.

Elliott, A. J.; Gillibrand, P.A. & Turrell, W.R. (1990) Tidal mixing near the sill of a scottish sea loch. *in*: *Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol 40, Cap.3, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.35-55.

Falconer, R. A. (1985) Short course on Sediment transport modelling in rivers, estuaries and coastal waters. University of Birmingham, Department of Civil Engineering, Vol.1, United Kingdom.

Ferreira, J. F. & Cunha, L. V. (1970) The regulation of Mondego River. Study of sediment discharge in prototype and description of the help given by a mathematical and a physical model in the solution of the problem. *Memória Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, nº359, 32 p.1-31.

Fisher, H. B. (1972) Mass transport mechanism in partially stratified estuaries. *Journal of fluib mechanics*, vol.53, part 4.

Flindt, M. R,; Pardal, M. Â, Lillebø, A. I.; Martins, I. & Oliveira, J. M. (2002) Nutrient dynamics in the intertidal pools of the Mondego estuary. 1- nutrients sources, sediment profiles, mineralisation and adsorption dynamics, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Fofonoff, N. P. & Millard Jr., R. C. (1983) Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Unesco technical papers in marine science*, nº44, 54p.

Folk, R. L. (1954) The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, **62**, 344-359.

Folk, R. L. and Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, 3-26.

Foreman, M. G. G. & Henry, R. F. (1989) The harmonic analysis of tidal time séries. *Adv. Water Resources*, 12:109-120.

Forstner, U. & Muller, G. H. (1975) Heavy metal accumulation in river sediments: a response to environment pollution. *Geoforum*, 14/73, pp. 53-61.

Forstner, U.; Calmano, W. & Schoer, J. (1982) Heavy metals in bottom sediments and suspended material from the Elbe, Weser and Ems Estuaries and from the German Bight (south eastern North Sea). *Thalassia Jugoslavica*, vol.18, nº1-4, pp.97-122.

Fortunato, A. B.; Baptista, A. M. & Luettich, R. A. (1989) A three-dimensional model of tidal currents in the mouth of the Tagus estuary. *Continental Shelf Research*, vol.17, pp.1689-1714.

Fortunato, A. B.; Oliveira, A. & Baptista, A. M. (1999) On the effect of tidal flats on the hydrodynamics of the Tagus estuary. *Oceanologica Acta*, vol. 22: 1, pp.31-44.

Fredsøe, J. & Deigaard, R. (1992) Mechanics of coastal sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol.3, (ed.) World Scientific, London, 369p.

Fredsoe, J. (1993) Elements of non-cohesive sediment transport. in: *Coastal, Estuarial and Harbour engineers´ reference book*. Ed. M.B.Abbott and W.A. Price. Plublished by E & FN Spon, London, pp. 83-92.

Freire, P. & Andrade, C. (1993) Evolução sedimentar recente da zona montante do estuário do Tejo. *Actas da 3ª reunião do Quaternário Ibérico*, Universidade de Coimbra, pp.247-255.

Freire, P. & Andrade, C. (1994) Sedimentation in channel systems of the upper tagus estuary-Cala do Norte. *Littoral 94*, Lisbon-Portugal, pp.523-532.

Freire, P. M. S. (1993) Caracterização e dinâmica de sedimentos em sistemas de canais do estuário do Tejo-Cala do Norte (Portugal). *Tese de Mestrado. Geologia Económica e Aplicada*, Universidade de Lisboa.

Friedman, G. M. & Sanders, J. E. (1978) *Principles of sedimentology*. Jonh Wiley & Sons, New York, 792p.

Friedrichs, C. T. & Aubrey, D. J. (1988) Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, 27, pp.521-545.

Friedrichs, C. T. & Madsen, O. S. (1992) Non-linear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments. Journal of Geophysical Research, 97, pp.5637-5650.

Friedrichs, C. T.; Lynch, D. R. & Aubrey, D. G. (1990) Velocity asymmetries in frictionally-dominated tidal embayments longitudinal and lateral variability. *in Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol 40, Cap.15, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.277-311.

Fry, V. A. & Aubrey, D. G. (1990) Tidal velocity asymetries and bedload transport in shallows embayments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 30, pp.453-473.

Gama, C., Dias, J. M. A. Ferreira, Ó. & Taborda, R. (1994) Analysis of storm surge in Portugal. *Littoral 94*, September 26-29, Lisbon Portugal. Pp381-387.

Gama, C., Taborda, R. & Dias, J. M. A. (1997) Sobreelevação do nível do mar de origem meteorológica ("Storm surge"), em Portugal continental. *Associação Eurocoast-Portugal*, Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal. pp. 131-149.

Gao, S & Collins, M. B. (1997) Changes in sediment transport rates caused by wave action and tidal flow time-assimetry. *Journal of Coastal Reasearch*, Vol.13, n.1 pp.198-201.

Garvine, R. W. (1977) River plumes and estuary fronts, In: *Estuaries, Geofphisics and the Environment, National Academy of Sciences*, Washington DC, pp30-35.

Geyer, W. R.; Trowbridge, J. H. & Bowen, M. M. (2000) The dynamics of a partially mixed estuary. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 30, Iss 8, pp 2035-2048.

Godin, G. (1985) Modification of river tides by the discharge. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 111, nº2, pp.257-274.

Godin, G. (1999) The Propagation of Tides up Rivers With Special Considerations on the Upper Saint Lawrence River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 48, No. 3, pp. 307-324.

Golden sofware (2002) SURFER. *Manual técnico*. versão 8.01.

Green, M. O. (1999) Test of sediment initial-motion theories using irregular-wave field data. *Sedimentology*, Vol 46, Iss 3, pp 427-441.

Green, M. O.; Bell, R. G.; Dolphin, T. J. & Swales, A. (2000) Silt and sand transport in a deep tidal channel of a large estuary (Manukau Harbour, New Zealand), *Marine Geology*, vol.163, nº1-4 pp.217-240.

Green, M. O.; Vicent, C. E.; McCave, I. N.; Dickson, R. R.; Rees, J. M. & Pearson, N. D. (1995) Storm sediment transport: observations from the British North Sea shelf. *Continental Shelf Research*, Vol.15, nº8, pp.889-912.

Guerreiro, N. M. S. (1984) Rede nacional de qualidade das águas a nível da DSRHS. 3ª parte: resultados analíticos obtidos durante o ano hidrológico de 1982-83. *Ministério do*

equipamento social. *Direcção geral dos Recursos e aproveitamentos hidráulicos*. *Direcção dos serviços regionais de hidráulica do sul*. Serviços de controle da poluição.

Hammond, F. D. C.; Heathershaw, A. D. & Langhorne, D. N. (1984) A comparison between Hields`thresshold and the movement of loosely packed gravel in a tidal channel. *Sedimentology*, Vol.31, pp.51-62.

Harleman, D. R. F. & Abraham, G. (1966) One-dimensional analysis of salinity intrusion in the Rotterdam Waterway. *Delft Hydraulics Laboratory Publication*, nº44.

Healey, R. G.; Pye, K.; Stoddart, D. R. & Bayliss-Smith, T. P. (1981) Velocity variations in salt marsh tidal creeks. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 13, pp.535-545.

Hidroprojecto (1987) Aproveitamento do Baixo Mondego. *Internal Report*.

Howarth, M. J. (1998) The effect of stratification on tidal current profiles. *Continental Shelf Research* 18: 11, pp.1235-1254.

Howe, M. R. & Tait, R. I. (1965) An evaluation of an in-situ salinity-temperature-depth measuring system. *Marine Geology*, vol.3, pp.483-487.

INAG (2002) *Caudais ecológicos em Portugal*, Ministério das Cidades, Instituto da Água, Direcção de Serviços de Planeamento - DSP, Ordenamento do Território e Ambiente. Lisboa.

Instituto Hidrográfico (1986) Aquisição e processamento de dados oceanográficos para a EDP da zona de Lavos/Pedrogão - Fiueira da Foz. Divisão de Oceanografia Física, Relatório técnico final TF OF-1/86 - Vol. I. Corpo e análise dos dados Abril de 84 a Julho de 1985.

Instituto Hidrográfico (1990) Tabela de marés 1991. Volume 1, *Ministério da Defesa Nacional, Marinha*, Lisboa, Portugal.

Instituto Hidrográfico (1993) *Tabela de marés 1993, volume I.* Pub.(N)-IH-220-OM, Lisboa, Portugal. Ministério da Defesa Nacional, Marinha, Instituto Hidrográfico.

Jackson II, R. G. (1981) Sedimentology of muddy fine-grained channel deposits in meandering streams of the Americam middle west. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol.51, nº4, pp.1169-1192.

Jackson, M. L. (1958) Organic matter determinations for soils. *Soil chemical analysis, Prentice-hall, inc, Englewood Cliffs, N.J.*, pp.205-226.

Jarrett, J. T. (1976) Tidal prism - inlet area relationships. General Investigation of Tidal Inlets. Department of the Army Corps of Engineers. Giti Report 3, February, 32p.

Junta Autónoma do Porto da Figueira da Foz (1993) *Agenda do Porto da Figueira da Foz*, Impressora Económica, Lda, Figueira da Foz, 88p.

Kjerfve, B. & Seim, H. E. (1984) Construction of net isopleth plots in cross-sections of tidal channels. *Journal of Marine Research*, vol. 42, pp.503-508.

Kjerfve, B. (1979) Measurement and analysis of water current, temperature, salinity, and density. in: *Estuarine hydrography and sedimentation*, Edited by K.R.Dyer, Cambrige university press, London, pp.186-225.

Kjerjve, B. (1987) Estuarine Geromorphology and physical oceanography. *In* DayJr. J. W., C. H. A. S. Hall, Kemp W. M. / Yánez-Aranciba, A. (eds), Estuarine Ecology, New York, Wiley, pp. 47-78.

Komar, P. D. & Carling, P. A. (1991) Grain sorting in gravel-bed streams and the choice of particle sizes for flow-competence evaluations. *Sedimentology*, vol.38, nº3, pp.489-502.

Komar, P. D. & Miller, M. C. (1975) On the comparison between the thereshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold. *Jounal of Sedimentary Petrology*, vol.45, pp. 362-367.

Kowalik, Z. & Polyakov, I. (1998) Tides in the sea of Okhotsk. *Journal of Physical Oceanography*, vol.28, nº7, pp.1389-1409.

Kreeke, J. (1992) Residual flow in naples Bay and its effect on constituent concentration, constituent flux and residence time. *in Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol 40, Cap.7, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.117-133.

Lencastre, A. & Franco, F. M. (1992) Lições de Hidrologia. Universidade Nova de Lisboa, faculdade de Ciências e Tecnologia, 453 p.

Lencastre, A. (1980) Controle de cheias, irrigação e drenagem da planície do Mondego. *Recursos hídricos*, Revista da Associação Portuguesa dos Recursos hídricos. Vol.1, nº 3, pp.29-42.

Lencastre, A. (1996) *Hidráulica geral*. (ed.) Armando Lencastre. Vertente Distribuidora de Livros Lda, Porto, 651p.

Lewis, D. W. & McConchie, D. (1994) *Analitical Sedimentology*. Chapman &Hall, New York, 197p.

Li, C. (2000) Interference of tidal elevation in shallow water using a vessel-towed acoustic Douppler current profiler, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, nºC11, pp.26225-26236.

Lillebø, A. I.; Neto, J. M.; Pardal, M. Â.; Flindt, M. R. & Marques, J. C. (2002a) The role of *Spartina marítima* and *Scirpus maritimus* to sediment pore-water profiles, and possible implications to the Mondego estuary nutrient dynamics, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Lillebø, A. I.; Pardal, M. Â.; Flindt, M. R,; Neto, J. M.; Macedo, F.; Martins, I. & Marques, J. C. (2002b) Nutrient dynamics in the intertidal pools of the Mondego estuary. IV- possible contribution to dissolved inorganic phosphorus loading, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

LNEC (1977) Estudo da erosão litoral a Sul da embocadura do Rio Mondego. Ministério da Habitação e Obras Públicas, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Estudo realizado a pedido da Direcção-Geral de Portos. Relatório. Lisboa. 69p.

Lobo, F. J.; Plaza, F.; González, R.; Dias, J. M. A.; Kapsimalis, V.; Mendes, I. & Diaz del Rio, V. (2004) Estimations of bedload sediment transport in the Guadiana Estuary (SW Iberian Península) during low river discharge periods. *In Journal of Coastal Research*, special issue n.41, pp. 12-26.

Loureiro, J. J. M. & Pinto, M. S. (1981) Relação entre a intensidade da precipitação para diferentes durações-Bacia do Mondego. *Recursos hídricos*, Revista da Associação Portuguesa dos Recursos hídricos. Vol.2, nº 3, pp.61-72.

Loureiro, J. J. M. (1980) Breve história dos molinetes hidráulicos Concise history of hydrometric current meters for use in river Gauging. *Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, vol. I, nº 3, pp. 79-107.

Lu, Y. Y.; Lueck, R. G. & Huang, D. Y. (2000) Turbulence characteristics in a tidal channel. *Journal of Physical Oceanography*, Vol.30, Iss.5, pp.855-867.

Lueck, R. G. & Lu, Y. Y. (1997) The logarithmic layer in a tidal channel. *Cont. Shelf Research*, Vol.17, nº14, pp.1785-1891.

Luketina, D. (1998) Simple Tidal Prism Models Revisited. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 46, Issue 1, January 1998, pp.77-84.

MacCready, P. (1999) Estuarine adjustment to changes in river flow and tidal mixing. *Journal of Physical Oceanography* 29: 4, pp.708-726.

Mantovanelli, A.; Marone, E.; da Silva, E. T.; Lautert, L. F.; Klingenfuss, M. S., Prata, V. P.; Noernberg, M. A.; Knoppers, B. A. & Angulo, R. J. (2004) Combined tidal velocity and duration assymetrie as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59, pp523-537.

Manuppella, G.; Zbyszewski, G & Ferreira, O. V. (1978) *Notícia explicativa da folha 23-A (Pombal) da Carta Geológica de Portugal na escala de 1:50.000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Mariano, E. & Dias da Silva, M. (1990) O encanamento do Mondego num documento de 1800. Actas do 1º Congresso do Baixo Mondego, Baixo Mondego Região e Património , pp. 131-141.

Marques, J. C.; Maranhão, P. & Pardal, M. A. (1992) Human impact assessment on the subtidal macrobenthic community structure in the Mondego estuary (Western Portugal) Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, vol.37, pp. 403-419.

Martins, I.; Pardal, M. Â.; Metelo, I.; Neto, J. M.; Oliveira, J. M. & Marques, J. C. (2002) *Enteromorpha spp*. (Uvalles: chlorophyta) growth in the south arm of the Mondego estuary: field growth rates with and without macrofaunal grazer effects, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Matos, M. (1985) *Os campos do Mondego*. Coimbra, CCRC, pp.77-93.

McCarthy, T. S.; Stanistreet, I. G. & Cairncross, B. (1991) The sedimentary dynamics of active fluvial channels on the Okavongo fan, Botswana. *Sedimentology*, vol.38, pp.471-487.

Middleton, G. V. & Southard, J. B. (1984) *Mechanics of Sediment Movement*. SEPM, Short Course Number 3, 2nd ed. Providence (USA), 401p.

Mied, R. P.; Handler, R. A. & Evans, T. E. (2000) Longitudinal convergence fronts in homogeneous rotating channels. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Vol 105, Iss C4, pp 8647-8658.

Miller, M. C., McCave, I. N. & komar, P. D. (1977) Threshold of sediment motion under unidirectional currents, *Sedimentology*, Vol. 24, pp.507-528.

Ministério do Plano e da Administração do Território (1986) Programa de desenvolvimento da Região Centro. Programas subregionias: Baixo Mondego, Comissão de Coordenação da Região Centro, Coimbra, 137p.

Miranda, L. B; Castro, B. M. & Kjerfv, B. (2002) *Princípios de Oceanografia Física de estuários*. Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, Brasil. 411p.

Moore, W. S.; Blantos, J. O. & Joye, S. B. (2006) Estimates of flushing tomes, sumarine groundawater discharge, and nutrient fluxes to Okatee Estuary, South Carolina. *Journal of Geophysical Research*, vol.111. pp.1-14.

Morisawa, M. (1985) *Rivers: form and process*. Geomorphology texts, nº7. Ed. by K. M. Clayton.Longman, London. 219p.

Nielsen, P. (1994) Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *Advanced series Ocean Engineering*. Vol. 4. World scientific.

Nihoul, J. C. J. & Jamart, B. M. (1987) *Threee-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Elsevier Oceanography Series, nº45. Elsevier, Oxford, 629p.

O`Connor, B.A. & Nicholson, J. (1988) A three-dimensional Model of suspended particulate sediment transport. Coastal Engineering, 12, pp.157-174.

Officer, C. B. & Kester, D.R. (1991) On estimating the non-advectiv tidal exchanges and advectiv gravitational circulation eschanges in an estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 32, 99-103.

Officer, C. B. (1981) Physical dynamics of estuarine suspended sediments. *Mar. Geol.*, nº40, pp. 1-14.

Oliveira, A. & Baptista, A. M. (1997) Diagnostisc modeling of residence times in estuaries. *Water Resour. Res.*, vol. 33, pp1935-1946.

Oliveira, A. (1996) Análise diagnóstica de tempos de residência em estuários. *Seminário sobre lagunas costeiras e ilhas-barreira da zona costeira de Portugal*. Associação Eurocoast-Portugal, Universidade de Aveiro, pp.163-166.

Oliveira, A.; Baptista, A. M. &Fortunato, A. B. (1996) Análise diagnóstica de tempos de residência em estuários. *Seminário sobre lagunas costeiras e ilhas-barreira da zona costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal*. Universidade de Aveiro, pp. 163-166.

Open University Course Team (1989) *Waves, Tides and Shallow water processes*. Ed Gerry Bearman. Pergamon Press & The Open University, Oxford, England, 187p.

Orlob, G. T. (1976) Impact of upstream storage and diversions on salinity balance in estuaries. In *Estuarine Processes*, Vol. II-Circulation, Sediments and Transfer of Material in the Estuary, Edited by Martin Wiley, New York, Academic Express, pp.3-17.

Paphitis, D.; Velegrakis, A. F.; Collins, M. B. & Muirhead, A. (2001) Laboratory investigations into the threshold of movement of natural sand-sized sediments under unidirectional, oscillatory and combined flows. *Sedimentology*, Vol.48, pp. 645-65.

Pardal, M. Â.; Marques, J. C.; Metelo, I.; Lillebø, A. I. & Flindt, M. R. (2002) Impact of eutrophication on amphipods *Melita palmata* and *Ampithoe valida* in the Mondego estuary, *in*: *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin Global Importance of local Experience*, Scientific ed. M. A. Pardal, J. C. Marques & M. A. Graça, Coimbra, Imprensa da Universidade.

Pazó, X. P.; Romaris, X. M.; Fdez-Cortes, F. & Moscoso, E. R. (1984) Salinidade e temperatura das augas de enseada de Baiona (Ría de Vigo) dende Novembro 1978 até Agosto de 1981. *Cuadernos da Área de Ciencias Marinas, Seminario de estudos Galegos*, vol. 1, pp 139-149.

Peters, H. & Bokhorst, R. (2000) Microstructure observations of turbulent mixing in a partially mixed estuary. Part I: Dissipation rate. *Journal of Physical Oceanography*, Vol.30, Iss 6, pp.1232-1244.

Peters, H. & Bokhorst, R. (2001) Microstructure observations of turbulent mixing in a partially mixed estuary. Part II: Salt flux and stress. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 31, Iss 4, pp 1105-1119.

Peters, H. (1995) Observations of stratified turbulent mixing in an estuary. Neap-to-spring variations during high river flow. Estuarine, Coastal and Shelf Science.

Peters, H. (1999) Spatial and temporal variability of turbulent mixing in an estuary. *Journal of Marine Research*, vol. 57: 6, pp.805-845.

Phillips, W. R. C. (1994) On the logarithmic-law constants and the turbulent boundary layer at low Reynolds numbers. *Applied Scientific Research,* vol.52,, pp.279-293.

Phillips, W. R. C. (2000) Eulerian space-time correlations in turbulent shear flows. *Physics of Fluids*, Vol.12, Iss 8, pp.2056-2064.

Pitts, P. A. (1998) Tidal and long-term volume transport through Jewfish Creek, Florida Keys. *BULLETIN OF MARINE SCIENCE*, vol.63, nº3, pp.559-570.

Pond, S. & Pickard, G. (1983) *Introductory Dynamical Oceanography*. 2ª edition, Pergamon Press. New York, 329p.

Prandle, D. (1985) *Tidal hydrodynamics*. Ed. John Wuley & Sons Fisher, pp.125-671.

Prandle, D. (1990) *Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, vol.40, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.3-6.

Prichard, D. W. (1955) Estuarine circulation patterns. *Proc.Am. Soc. Civ. Eng.*, 81, nº717.

Pritchard, D. W. (1952) Salinity distribution and circulation in the Chesapeake estuarine system. Journal of Marine Research, 11, pp.106-123.

Pritchard, W. D. (1971) Two-dimensional models. *in* Ward Jr., G. H. & Espey Jr. W. H. (eds). *Estuarine Modelling: an assessment capabilities and limitations for resource management and pollution control*. Water Pollution Control Reserarch Series. Austin, Tracor, pp. 22-33.

Rajkumar, W. S. & Chang, A. S. (2000) Suspended particulate matter concentrations along the East-West Corridor, Trinidad, West Indies. *Atmospheric Environment*, vol. 34: 8, pp.1181-1187.

Raudkivi, A. J. (1990) *Loose Boundary Hydrodinamics*. Pergamon Press, 3rd edition, New York, 538p.

Raudsepp, U. (1998) Current dynamics of estuarine circulation in the lateral boundary layer. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, vol. 47: 6, pp.715-730.

Rebelo, F.; Cunha, L. & Almeida, A.C. (1990) Baixo Mondego – Planície aluvial do Mondego (Paul da Madriz). "Contribuição da Geografia Física para a inventariação das potencialidades turísticas do Baixo Mondego". *Cadernos de geografia*, Coimbra, 9 pp.3-34.

Reis, R. P. B. P. dos & Duarte, D. N. R. (1990) Les mécanismes prédominants dans la transférence des sédiments dans l'estuaire du Mondego. *Litoral 1990 (Comptes rendus du ler symposium internacional de l'Association européenne EUROCOAST)*, p141-144.

Reynaud, J.-Y.; Tessier, B.; Berné, S.; Chamley, H. & Debatist, M. (1999) Tide and wave dynamics on a sand bank from the deep shelf of the Western Channel approaches, *Marine Geology*, vol.161, nº2-4, pp.339-359.

Ribeiro, O.; Lautensach, H. & Dauveau, S. (1991) O mar da plataforma continental e o litoral português. *Geografia de Portugal*, vol. I-Posição geográfica e o território, 2ª ed. Sá da Costa.

Rolinski, S. & Eichweber, G. (2000) Deformations of the tidal wave in the Elbe estuary and their effect on suspended particulate matter dynamics. *Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere*, Vol 25, Iss 4, pp 355-358.

Sanford, L. P.; Boicourt, W. C. & Rives, S. R. (1992) Model for estimating tidal flushing of small embayments. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol.118, nº6, pp635-655.

Santos, F. J. S.; Almeida, J. P. L. & Carmo, J. S. A. (1989) *Estudo da agitação marítima*. Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego", Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Relatório de Actividades.

Santos, F. J. S.; Almeida, J. P. L.& Carmo, J. S. A. (1990) Relatório de Progresso. *Relatório de Actividades* Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego"-Anexo II Estudo da agitação marinha. *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*.

Santos, F. J. S.; Almeida, J. P. L.& Carmo, J. S. A. (1991) Relatório Final do Projecto de Investigação "Lançamento de Bases para o estudo Integrado do estuário do Mondego"-Estudo da agitação marítima. *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*.

Sauvaget, P.; David, E. & Soares, C. G. (2000) Modelling tidal currents on the coast of Portugal, Coastal Engineering, vol.40, nº4, pp.393-409.

Schroeder, W. W.; Dinnel, S. P. & Wiseman W. J. Jr (1990) Salinity structure of a shallow, tributary estuary. in: *Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol 40, Cap.9, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.155-171.

Scott, C. F. (1993) Canonical parameters for estuary classification. *Estuarine, Coastal and shelf science*, vol.36, pp. 529-540.

Serviço Cartográfico do Exército (1966) Carta militar de Portugal, Esc.1/250.000 Série M586, folha nº3. Dados complementares. M28/93. Documentação Geográfica Militar, Serviço Cartográfico do Exército.

Shetye, S. R. & Gouveia, A. D. (2002) On the role of geometry of cross-section in generating flood-dominance in shallow estuaries. *Estuarine, Cosatal and Shelf Science*, 35, pp113-126.

Sinha, P. C.; Rao, Y. R.; Dube, S. K.; Murthy, C. R. & Chatterjee, A. K. (1999) Application of two turbulence closure schemes in the modelling of tidal currents and salinity in the Hooghly Estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 48: 6, pp.649-663.

Soares, A. F.; Cunha, L. & Fonseca, J. (1989) Depósitos quaternários do Baixo Mondego. Tentativa de coordenação morfogenética. *Actas, II Reunião do Quaternário Ibérico*, Madrid.

Song, T. & Graf, W. H. (1996) Velocity and turbulence distribution in unsteady open-channel flows. Journal of Hyd. Eng., vol.122, nº3, pp.141-154.

Soulsby, R. (1997) *Dynamics of a marine sands. A manual for practical applications*. Published by Thomas Telford Publications. London. 249p.

Speer, P. E. & Aubrey, D. J. (1985) A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part II: theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, pp.207-224.

Speer, P. E.; Aubrey, D. G. & Friedrichs, C. T. (1991) Chapter 16 *in* Parker, B.B.. *Tidal Hydrodynamics*, pp.321-339. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Sreenivasan, K. R. (1999) Fluid turbulence. *Reviews of Modern Physics*, Vol 71, Sp. Iss. SI, pp S383-S395.

Stacey, M. T. (1996) Turbulent mixing and residual circulation in a partially stratified estuary. A dissertation submitted to the department of civil engineering and the commitee on graduate studies of Stanford University in partial filfillment of the requirements for thr degree of doctor of philisophy.

Stacey, M. T.; Monismith, S. G. & Burau, J. R. (1999) Measurements of Reynolds stress profiles in unstratified tidal flow. *Journal of Geophysical Research*, vol.104, nºC5, pp.10933-10949.

Stacey, M. T.; Monismith, S. G. & Burau, J. R. (1999) Observations of turbulence in a partially stratified estuary. *Journal of Physical Oceanography* 29: 8 Part 2, pp.1950-1970.

Stommel, H. (1953) The role of density currents in estuaries. *Proc. Minnesota International Hydraulicas Convention*. Minneapolis, University of Minnesota, pp305-312.

Taborda, R. & Alveirinho Dias, J. (1992) Modelação de processos da dinâmica sedimentar na plataforma continental portuguesa. *Geonovas* especial, nº3, pp.117-138.

Taborda, R. & Dias, J. M. A. (1989) Recent sea level rise in Portugal (based on tide-gauge data). Revista de Geociências do MNHN, nº1.

Tee, K. T. (1990) Modelling of low-frequency salinity variations in the St. Lawrence Estuary. in: *Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol 40, Cap.12, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.209-229.

Thatcher, L. & Harleman, D. R. F. (1972) A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report nº144, MIT, Cambridge, Massachusets, p. 231.

Tolhurst, T. J.; Black, K. S.; Shayler, S. A.; Mather, S.; Black, I.; Baker, K & Paterson, D. M. (1999) Measuring the in situ erosion shear stress of intertidal sediments with the Cohesive Strength Meter (CSM). *Estuarine Coastal and Shelf Science* 49: 2, pp.281-294.

Tonda, P. L. (1999) Propagación de la onda de marea en estuaries somas. *Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. 228p.

Trowbridge, J. H.; Geyer, W. R.; Bowen, M. M. & Williams, A. J. (1999) Near-bottom turbulence measurements in a partially mixed estuary: Turbulent energy balance, velocity structure, and along-channel momentum balance. *Journal of Physical Oceanography*, Vol 29, Iss 12, pp 3056-3072.

Tucker, M. (1988) *Tecniques in Sedimentology*, Blackell Scientific Publications, Oxford, 394p.

Uncles, R. J.; Bloomer, N. J.; Frickers, P. E.; Griffiths, M. L.; Harris, C.; Howland, R. J. M.; Morris, A. W.; Plummer, D. H. & Tappin, A. D. (2000) Seasonal variability of salinity, temperature, turbidity and suspended chlorophyll in the Tweed Estuary. *Science of the Total Environment* 251, pp.115-124.

Uncles, R. J.; Morris, K. P.; Stephens, J. A.; Robinson, M. C. & Murphy, R. J. (1999) Aircraft and sea-truth observations of salinity and temperature within the Tweed Estuary and coastal-zone frontal system. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.20, Iss.3, pp.609-625.

Unesco (1991) *Processing of Oceanographic Station Data*. JPOTS editorial panel, Paris, 138 pp.

Unesco (1992) Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. International Hydrological Programme by the working group project 4.4b(IHP-III), Ed. H. van der Tuin.

Valle-Levinson, A. & Atkinson, L. P. (1999) Spacial gradients in the flow over an estuarrine channel. *Estuaries*, Vol 22, Iss 2A, pp 179-193.

Valle-Levinson, A.& Li, C. (2000) Convergence of lateral flow along a coastal plain estuary. *Journal of Geophysical Research*, Vol 105, Iss C7, pp.17045-17061.

van Rijn, L. C. (1984) Sediment transport Part ; Bed load transport. J. Hydraulica Engineering, ASCE, Vol.110, pp.1431-1456.

van Rijn, L. C. (1989) *Handbook of Sediment transport by currents and waves*. Delft Hydraulics, Report H 461.

van Rijn, L. C. (1993) *Principles of of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas*. Aqua Publications. Netherlands.

van Rijn, L. C. (1994) *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*. Second edition, Aqua Publications. 335.

Veloso, F. A. C. (1990) O baixo Mondego-Seu património hídrico *subterrâneo*. *Preservação e protecção dos seus aquíferos e da água subterrânea que neles circula*. Actas do 1º Congresso do Baixo Mondego, Região e património. pp.67-99.

Vongvisessomjai, S. & Rojanakamthorrn, S. (1989) Interaction of tide and river flow. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol.115, nº1, pp.86-104.

Wang, C.-F.; Hsu, M.-H. & Kuo, A. Y. (2004) Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 60, Issue 3, pp.381-393.

Wang, Y. P.; Zhang, R. & Gao, S. (1999a) Velocity variations in salt marsh creeks, Jiangsu, China. Journal of Coastal Research, 15, pp.471-477.

Wang, Y. P.; Zhang, R. & Gao, S. (1999b) Geomorphic and hydrodynamic responses in salt marsh creeks, Jiangsu, China. Chinese Science Bulletin, Vol.44, nº6, pp.544-549.

Weber, O.; Gonthier, E. & Faugeres, J. C. (1991) Analyse granulometrique de sediments fins marins: comparaison des resultats obtenus au sedigraph et au malvern. *Bull. Inst. Géol., Bassin d`Aquitaine, Bordeaux*, nº50, pp.107-114.

Wells, J. T.; Adams, C. E. Jr.; Park, Y. A. & Frankenberg, E. B. (1990) Morphology, sedimentology and tidal channel processes on a hight-tide-range mudflat, west coast of South Korea. *Marine Geology*, vol.95, pp.111-130.

Wenning, C. J. (2000) Ebb to flow - Turning the tide of beekeeping - Part II - Conclusion. *American Bee Journal*, vol. 140: 2, pp.114-117.

West, J. R. & Shiono, K. (1985) A note on turbulent perturbations of salinity in a partially mixed estuary. Estuarine and Coastal Shelf Science, vol. 20, pp.55-78.

Wiberg , P. L. & Smith, J. D. (1987) Calculation of the Critical Shear Stress for Motion of Uniform and Heterogeneous Sediments, *Water Resources Research*, Vol.23, nº8, pp.1471-1480.

Williams J. J. ; Thorne, P. D. & Heathershaw; A. D. (1989) Measurements of turbulence in the benthic boundary layer over a gravel bed. *Sedimentology*, vol.36, nº6, pp.959-971.

Williams, S. J.; Dodd, K. & Gohn, K. K. (1990) Coasts in crisis. *U. S. Geological Survey*, Circular 1075, 32p.

Woong, A. B. & McDonald, N. R. (2004) Coastal currents generated by outflow and vorticity and their interation with topography. *Continetal Shelf Research*, 24, pp1531-1547.

Yalin, M. S. (1977) *Mechanics of sediment transport*. 2nd edition, Pergamon Press. 297p.

Yalin, M. S. (1985) On the determination of ripple geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.111, nº8, pp.1148-1155.

Yanagi, T.; Matsuda, O.; Tanabe, S. & Uye, S. (1992) Interdisciplinary study on the tidal front in the Bungo Chanel, Japan. *in*: *Coastal and Estuarine studies; Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone*, Vol.40, Cap.30, ed. David Prandle, American Geophysical Union, Washington DC, pp.617- 629.