

**ÓSCAR MANUEL FERNANDES CERVEIRA FERREIRA**

**Unidade de Ciências e Tecnologias dos Recursos Aquáticos**

**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**MORFODINÂMICA DE PRAIAS EXPOSTAS:**

**APLICAÇÃO AO SECTOR COSTEIRO AVEIRO - CABO MONDEGO**

**FARO**

**1998**



**ÓSCAR MANUEL FERNANDES CERVEIRA FERREIRA**

T17  
Carlos Zuzima  
2009

**Unidade de Ciências e Tecnologias dos Recursos Aquáticos**  
**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**MORFODINÂMICA DE PRAIAS EXPOSTAS:**  
**APLICAÇÃO AO SECTOR COSTEIRO AVEIRO - CABO MONDEGO**

Dissertação apresentada à Universidade do  
Algarve para obtenção do grau de Doutor em  
Ciências do Mar, especialidade de Geologia  
Marinha

**FARO**  
**1998**

**CTACOMAR**  
Centro de Investigação dos Ambientes Costeiros e Marinhos  
da Universidade do Algarve

**Este trabalho foi financiado pela JNICT,  
através da bolsa CIÊNCIA/BD/816/90.**

*Dedico esta dissertação:*

*Ao meu avô Alfredo "Fidalgo", que ainda antes de eu ter acabado o curso me pedia que fosse doutor a sério, esperando que a sua vontade se concretize.*

*À minha avó Minga, que me deu alma e força, com um pedido de desculpas por me ter atrasado de forma tão definitiva.*

*Aos criadores do meu mundo, Lela e Manel, que me transmitiram os sonhos e a realidade, fazendo-me lutar sempre pelos primeiros.*

## PREFÁCIO

*Era o terceiro dia da campanha, a terceira vez em que percorríamos aquela marginal com o equipamento às costas. Era, ainda, a terceira vez que o via pintar, sentado no seu banco, no passeio da marginal, escutando o mar.*

*Na volta, depois do trabalho feito, decidi ser a altura de saciar a minha intensa curiosidade. Queria ver o quadro, queria ver as formas diferentes de analisar o mar. Fui-me aproximando pelo passeio, reparando pela primeira vez numa pequena bengala cinzenta, caída no chão, junto aos pés do pintor. Ao torneá-lo, olhei de esguelha para o quadro, surpreendendo-me a sua beleza, mas sobretudo a sua inadequação à realidade. O desenho, intenso, a carvão, registava formas irreconhecíveis, vibrantes, cheias de energia, mas não era possível, ali, identificar aquele mar, aquela praia, nem sequer aquelas dunas tão próximas.*

*Reparei pela primeira vez na posição desencontrada dos seus olhos cinzentos, apontando o céu. Pensei apenas que aquele homem nunca iria ver a sua obra, nem sequer ter a infelicidade de saber que estava enganado. Pensei também, mais tarde, muito mais tarde, em quantas vezes seremos também nós cegos, mesmo olhando o mar de frente.*

*Óscar Cerveira, 1996*

## AGRADECIMENTOS

No final desta dissertação, que se prolongou por mais de seis anos, desenvolvida em três instituições (Museu Nacional de História Natural, Instituto Hidrográfico e Universidade do Algarve) e englobando várias campanhas de campo, possuo a imagem e o nome de pelo menos uma centena de pessoas a quem devo agradecer. Todas elas contribuíram com a sua ajuda, apoio, incentivo, amizade e companheirismo para o trabalho que agora se apresenta. Seria difícil efectuar um rol de agradecimentos pessoais, pelo que alguns dos nomes estarão misturados em agradecimentos gerais. Tal não significa, no entanto, um menor apreço pela ajuda prestada, sendo justo salientar algumas pessoas pelo papel fundamental desempenhado.

O meu especial agradecimento:

Ao Prof. Doutor Alveirinho Dias, meu orientador científico, profissional e frequentemente social, pelo que me ensinou, pelo que me obrigou a aprender e pelas barreiras que ensina a vencer. Pautarei a minha vida profissional por muitos desses ensinamentos, esperando que este agradecimento seja visível através da minha conduta diária.

Ao Professor Doutor Galopim de Carvalho, por nos ter aberto as portas do Museu, pelo exemplo a seguir, pelos incentivos constantes, pelo carinho e disponibilidade sempre evidentes.

Ao Prof. Doutor César Andrade, pela co-orientação na fase inicial desta dissertação, pelo apoio prestado, pelas agradáveis ideias que me foi transmitindo e pela cedência de dados de perfis do projecto Atlas dos Ambientes Geológicos de Portugal.

Ao Prof. Doutor Tomasz Boski, por me ter apoiado e ajudado na inserção na Universidade do Algarve, por me ter possibilitado a continuidade do meu trabalho e por saber corresponder com humor às minhas intervenções.

A todo o pessoal do Museu Nacional de História Natural, pelo extremo carinho, pelo apoio de campo e laboratorial sempre prestado. Foi a minha primeira "casa" profissional e continuo a sentir que ainda lá pertenço, sempre que lá vou.

À JNICT (actual FCT) pela bolsa concedida (CIENCIA/BD/816/90) e por terem pacientemente continuado a esperar por esta dissertação.

Ao Instituto Hidrográfico, por ter aceite ser instituição acolhedora da minha bolsa de doutoramento, pelo apoio que possui na cedência de equipamento e de dados, nomeadamente de agitação, e pela formação em topografia que me foi fornecida. De entre as pessoas desta instituição devo salientar o apoio e ajuda da Dra. Manuela Matos, da Aurora, do pessoal do laboratório de sedimentologia (em particular do Sr. Cunha), do Cte. Seabra de Melo, do Cte. Ferreira Coelho, da Dra. Mariana Costa, do Fernando Vásquez e do Sr. Figueiredo.

Aos colegas docentes e não-docentes da Universidade do Algarve, que me proporcionaram uma óptima integração, possibilitando uma fácil continuidade do trabalho desenvolvido. É justo salientar os membros do Grupo de Geociências e, em particular, a Minda, por ter sido o meu ponto de apoio inicial, bem como pelas desgraçadas cantorias que ainda tem de ouvir.

A todo o Grupo DISEPLA, em especial ao "núcleo duro", pela enorme amizade, pela excelente disposição no trabalho e pelo sentido de grupo que nos ajudou a evoluir pessoal e profissionalmente.

Aos componentes do CIACOMAR, esperando que se crie neste centro a mesma camaradagem e espírito de trabalho que tive possibilidade de partilhar no DISEPLA.

Aos inúmeros colegas, amigos e alunos que participaram nas campanhas de campo realizadas. Nunca se registou um único problema ou qualquer incompatibilidade e sempre que falo com alguém que já participou em campanhas, existem sempre boas recordações a contar.

Àqueles que me ajudaram no tratamento dos dados e amostras utilizadas na tese, nomeadamente, ao João, Ana M. e Hélder pelo tratamento de dados de perfis, ao Marcos pelo tratamento de dados de remobilização, ao Paulo Santana pelas granulometrias efectuadas, à Natália e ao António pelo tratamento de dados de traçadores, ao Paolo e ao Rui pelo tratamento de dados de ondas e traçadores.

Ao Rui e ao Paolo as muito frutíferas discussões científicas tidas e as ideias que me deram para incorporar na tese.

Aos meus amigos por estarem sempre presentes quando era preciso esquecer a tese.

À Ana, pelos dias de Agosto, entre muitas outras coisas.

À minha família, por 32 anos de apoio ininterrupto, de todos.

Torna-se mais fácil e agradável fazer uma tese com tantos e tão bons apoios. Torna-se rico olhar para trás e ver o rol de amizades adquiridas. Peço desculpa pelo mau feitio e falta de paciência que me caracterizam.

## RESUMO

A análise integrada da morfodinâmica das praias e dos mecanismos forçadores associados, permite estabelecer formas de previsão do comportamento evolutivo das áreas costeiras. O objectivo principal deste estudo é a obtenção de ferramentas que possibilitem a previsão da evolução das praias a diferentes escalas temporais, em função das condições hidrodinâmicas actuantes, das características morfológicas e da sedimentologia. Nomeadamente, com aplicação concreta às praias do sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego, composto por praias expostas com energia incidente elevada.

Para alcançar este objectivo principal foram efectuadas séries de levantamentos topográficos e campanhas de campo específicas, na área em causa, com medições da morfologia da praia, das ondas e dos níveis de "runup" atingidos. Foram, ainda, utilizados dados morfológicos e hidrodinâmicos complementares, de campanhas de campo realizadas no Algarve, igualmente de praias expostas mas sujeitas a um regime energético baixo a moderado.

O estudo da transformação da altura da onda ao longo da zona de rebentação permitiu observar uma atenuação média da altura da onda de 82%, desde a rebentação inicial até à final, para locais com três linhas de rebentação, sendo as duas iniciais associadas a barras submersas e a terceira sobre a face da praia. Com base nos dados adquiridos e em equações disponíveis na literatura, foram estabelecidas formulações para previsão da altura da onda reformada, para a área em estudo, dependentes da altura da onda na rebentação e da profundidade da coluna de água sobre a crista da barra sobre a qual ocorreu rebentação ( $d_c$ ). Os resultados apontam para a existência de uma dependência acentuada do valor de altura de onda reformada após rebentação ( $H_r$ ), relativamente ao valor de  $d_c$ , estando o valor de  $H_r$  compreendido entre 25% e 50% da profundidade média a que ocorre rebentação ( $d_c$ ).

A dissipação média de energia associada à rebentação sobre barras foi de 95.2% para a generalidade das condições observadas, subindo para os 99.3% caso se considerem apenas os grupos de ondas que apresentaram rebentação significativa sobre a barra externa. Foi desenvolvida uma formulação para previsão da taxa de energia dissipada da primeira para a última rebentação, em função da altura da onda. O coeficiente empírico determinado para esta formulação deverá variar em função do valor de  $d_c$ . O efeito de sobreelevação do nível do mar na diminuição da energia

dissipada foi considerado, tendo-se calculado o valor da energia não dissipada associado a cada sobrelevação, através de uma equação que se baseia na altura crítica acima da qual ocorre rebentação sobre barras.

Os níveis de "runup" atingidos, na área em estudo, podem ser previstos através de uma formulação do tipo das inicialmente propostas por Hunt ou por Battjes, mas com coeficientes empíricos adequados aos dados de campo, sendo possível determinar para que condições de agitação e morfologia se espera a ocorrência de galgamentos. Efectuou-se um ensaio, testando a incidência de uma altura de onda com período de retorno de 100 anos, sendo previsível o galgamento de elevadas áreas do cordão dunar na zona em estudo.

A caracterização morfodinâmica à macroescala, recorrendo aos parâmetros morfodinâmicos mais comuns, permitiu confirmar que o comportamento das praias da área em estudo possui importantes variações perpendicularmente à linha de costa, transitando-se de um ambiente dissipativo com rebentação progressiva, na barra externa, para condições intermédias a reflectivas com rebentação mergulhante, na face da praia.

Recorrendo à análise volumétrica, introduziu-se o conceito de índice de vulnerabilidade morfológica ( $I_v$ ), que relaciona a variação volumétrica anual de uma praia com o seu comportamento de médio prazo, através da expressão  $I_v = (V_{\max} - V_{\min})/V_{\text{med}}$ , sendo  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  e  $V_{\text{med}}$ , respectivamente o volume máximo, mínimo e médio de um local, no período de estudo escolhido. Para os dados utilizados, definiu-se que praias com  $I_v < 0.35$  são robustas, enquanto que locais com  $I_v > 0.9$  são considerados extremamente frágeis. Os valores intermédios correspondem à designação de praia frágil. Determinou-se, ainda, o índice do momento (substituindo  $V_{\text{med}}$  por  $V_m$  - volume do perfil em determinada observação), que permite obter uma quantificação da condição de cada local em dado momento. A utilização de  $I_v$  conjuntamente com as condições de agitação vigentes permitiu obter uma formulação para a determinação da máxima variação vertical anual esperada para cada praia.

Através da aplicação das formulações existentes na literatura para determinar a evolução à macroescala entre perfil de barra e perfil de berma obteve-se uma aproximação semi-quantitativa da variabilidade da praia relativamente à agitação incidente e estimou-se em que estado evolutivo a praia se encontra para cada conjunto de características da agitação. As mesmas formulações provaram ser eficazes para

determinar a transição barra/berma à mesoescala, caso se utilize a variação morfológica na comparação, em detrimento da variação volumétrica utilizada à macroescala. Os índices de Dean e de Larson e Kraus foram os que permitiram a obtenção de resultados mais ajustados.

A utilização conjunta da previsão de "runup" com o nível de maré considerado permitiu determinar a elevação teórica da berma, obtendo-se as alturas da crista da berma esperadas para cada tipo de agitação, de carácter construtivo.

O recurso ao declive da face da praia ( $\tan\beta$ ), em conjunto com a altura da onda ( $H_{so}$ ), resultou na obtenção de uma equação de aplicação generalizada para previsão da profundidade média de mistura ( $Z_m$ ):  $Z_m = 1.86H_{so}\tan\beta$ . Esta equação teve por base os dados adquiridos nas campanhas de campo utilizadas neste trabalho e o conjunto de dados disponíveis na literatura.

Considerando que as principais variações morfodinâmicas ocorrem no decurso de temporais, foram testados dois modelos de erosão de praias e dunas por temporais, sendo um de aplicação genérica à totalidade de um sector costeiro e outro de aplicação local a local. Apesar das diferentes características de cada modelo, os resultados médios obtidos não foram muito díspares tendo, inclusive, sido relativamente próximos dos valores medidos no campo, com que foram validados. Os erros médios obtidos foram geralmente próximos ou inferiores a 20%, enquanto que os erros pontuais raramente excederam 50%, para a erosão prevista acima do nível médio do mar. Os perfis finais previstos foram globalmente concordantes com os registados, com algumas excepções, sobretudo no modelo generalista. Este, sofreu adaptações por forma a adequar melhor as suas previsões aos resultados registados, na área de aplicação e de estudo desta dissertação.

Com base nos modelos, efectuaram-se duas simulações, para um "temporal médio" e para um "temporal centenário", prevendo-se perfis pós-temporal, volumes de erosão e recuos dunares. Registou-se que as praias da área em estudo, em condições iniciais de perfil de Verão e de perfil médio, possuem capacidade de resposta a um "temporal médio" (período de retorno de 0.7 anos), sem que ocorra recuo dunar. Pelo contrário, para um temporal com período de retorno de 100 anos ("temporal centenário") será de esperar recuos dunares importantes, com franca possibilidade de ruptura total do cordão dunar em locais onde este se encontra fragilizado.

O trabalho efectuado permitiu a obtenção de uma caracterização mais detalhada da morfodinâmica da área em estudo e, com base em dados de campo, determinar ou adequar formas de previsão de comportamento da praia, frequentemente de maneira quantitativa. Estes resultados, se devidamente utilizados e frequentemente testados, permitem conhecer a evolução da área, local a local, para as características morfológicas e hidrodinâmicas actuanes, tanto à meso como à macroescala. Será igualmente possível a sua aplicação a outros sectores costeiros, com iguais ou distintas características, desde que exista uma validação prévia das formulações.

## ABSTRACT

The integrated analysis of beach morphodynamics and its forcing factors allows a quantitative evaluation of coastal changes. The main purpose of this study is the development of predictive tools to evaluate beach behaviour at different time scales as a function of the prevailing hydrodynamical, morphological and sedimentological factors. Namely, of the coastline between Aveiro and Cabo Mondego, which is composed of exposed beaches with high levels of wave energy.

In order to accomplish this objective, a series of topography surveys were carried out, together with specific field experiments including measurements of the morphology, waves and runup levels. Complementary hydrodynamic and morphological data was used, from Algarve field experiments on exposed beaches with low to moderate wave energy.

Observed wave height reduction across the breaking area, which includes three breaker lines (the initial ones associated with longshore bars and the final one over the beach face), was on average 82% between the initial and the final breaking. Based on acquired data and previously published equations, predictive formulations were established which relate the reformed wave height with both initial wave height and water depth over the bar crest ( $d_c$ ). The results obtained point to an important dependence of the reformed wave height ( $H_r$ ) on  $d_c$  values, with  $H_r$  values being between 25% and 50% of the average depth at which the breaker occurs ( $d_c$ ).

The average energy dissipation associated with breaking waves over bars was 95.2%, if all observations are included. However, if only waves with a significant breaker over the offshore bar are taken into consideration, the value increases to 99.3%. A predictive equation relating the rate of energy dissipation from the initial to the final breaker line with wave height was established. According to the observations, the computed empirical coefficient of this equation should change as a function of  $d_c$ . The decrease of wave energy dissipation due to storm surges was also considered and predicted by an equation that computes non-dissipated energy associated with each storm surge value as a function of the critical value above which the breaking process occurs.

Runup levels for the study area can be predicted by a formulation similar to those initially proposed by Hunt or by Battjes, but with the empirical coefficients fitted

to the obtained field data. Based on this equation wave and morphological conditions under which overwashes are expected to occur were determined. The incidence of a virtual wave height with 100 year return period at the study area was simulated, resulting in the prediction of overwashes over extensive areas of the dune ridge.

Macroscale morphodynamic characterisation, using the most common morphodynamic parameters, supports the existence of an important cross-shore variability at the studied beaches. There is a transition from dissipative behaviour with spilling breakers, over the external bar, to intermediate to reflective conditions with plunging breakers, over the shoreface.

The concept of a morphological vulnerability index ( $I_v$ ) was introduced.  $I_v$  relates the annual volumetric changes on a beach with its long-term behaviour, through the expression  $I_v = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\text{med}}$ , where  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  and  $V_{\text{med}}$  are the maximum, minimum and average beach volumes respectively, for a chosen period. For the data set used it was established that beaches with  $I_v < 0.35$  are robust beaches, while sites with  $I_v > 0.9$  are classified as extremely fragile. Sites with intermediate values are considered fragile beaches. The concept of the moment index was also developed, allowing the quantification of beach behaviour at each particular moment, replacing  $V_{\text{med}}$  by  $V_m$  (beach volume at a particular moment), in the above expression. The integrated use of  $I_v$  and wave conditions allowed the determination of an equation to compute maximum annual vertical variability at each beach.

The application of existing formulations to determine macroscale transition between berm and bar profile constituted a semi-quantitative approach to studying beach variability, allowing the estimation of the beach evolutionary stage associated with each incident wave condition. The same formulations were effective to determine mesoscale bar/berm transition, by using a morphological comparison instead of the volumetric approach used for macroscale. The indexes proposed by Dean and by Kraus and Larson were the ones that produced predictive results closest to field data.

Using the runup prediction together with tidal level, theoretical berm elevation was determined, giving the expected crest berm height associated with each accretionary wave regime.

The use of the beach face slope ( $\tan\beta$ ) together with the wave height ( $H_{s0}$ ) resulted in the development of a generic equation to predict average sediment mixing

depth ( $Z_m$ ):  $Z_m = 1.86H_{so}\tan\beta$ . The development of this equation was based both on data obtained in field experiments used in this work and on data available in literature.

Two different models to compute beach and dune erosion associated with storm conditions were tested, one of them being a generic application to the entire coastal stretch while the other was applied to each site separately. Although they have different characteristics, the average results of both models were similar and reasonably fitted the field results. Average error associated with the prediction of erosion above mean sea level was generally smaller than 20%, while single errors rarely exceeded 50%. Predicted post-storm profiles were similar to the measured ones with a few exceptions, mainly associated with the generic model. This model was calibrated, fitting the predictions to the obtained results, in order to get a better adjustment for the study area.

In this study, model simulations were run predicting post-storm profiles, erosion volumes and dune retreat for an "average storm" and for a "centenary storm". The model estimated that beaches of the study area under initial conditions of summer or average profile would not undergo dune retreat for an "average storm" (return period of 0.7 years). However, for a 100 years return period storm important dune retreat was predicted at almost all sites, including the possibility of a complete erosion of the dune ridge at several places.

This work contributed towards a more detailed morphodynamic characterisation of the study area. Based on field data, predictive equations were formulated or improved, in order to determine beach behaviour quantitatively. The results of this study will allow a better knowledge of the study area evolution for the existent morphological and hydrodynamic conditions, both at meso and macroscale. In addition, if properly calibrated and validated, the developed predictive tools can be applied to the comprehensive study of other coastal sectors.

## Índice Geral

Título	i
Dedicatória	iii
Prefácio	iv
Agradecimentos	v
Resumo	viii
Abstract	xii
Índice geral	xv
Índice de figuras	xx
Índice de tabelas	xxvi
Lista de símbolos	xxxii
<b>PARTE I - CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	
1. Introdução e objectivos	3
2. Aquisição e tratamento dos dados	7
2.1. Campanhas de campo	7
2.1.1. Campanhas MOLICEIRO	7
2.1.2. Campanha Tocha 92	10
2.1.3. Campanha Areão 95	12
2.1.4. Campanha LUAR Mira-Tocha	13
2.1.5. Campanha LUAR Culatra 93	14
2.1.6. Campanha LUAR Garrão 95	14
2.1.7. Campanha LUAR Faro 96	15
2.1.8. Campanha Quarteira 96	15
2.1.9. Campanha Quarteira 97	16
2.1.10. Campanha LUAR Faro 97	16
2.1.11. Campanhas VASA	16
2.2. Aquisição e tratamento dos dados morfológicos	17
2.3. Aquisição, tratamento e validação dos dados de agitação (obtidos por estimativa visual)	18
2.3.1. Aquisição de dados	19
2.3.1.1. Campanha Tocha 92	20
2.3.1.2. Campanha Areão 95	21
2.3.2. Estimativa de erros na observação visual da altura das ondas	22
2.3.2.1. Estudos prévios	22

2.3.2.2. Análise comparativa dos dados obtidos	24
2.3.3. Observações finais	27
2.4. Aquisição e tratamento de níveis de "runup"	28
2.5. Aquisição e tratamento dos dados de remobilização	32
2.6. Aquisição e tratamento dos dados sedimentológicos	33
3. Enquadramento	34
3.1. Condições oceanográficas	34
3.1.1. Marés	34
3.1.2. Agitação marítima	34
3.1.2.1. Agitação ao largo	34
3.1.2.2. Agitação na rebentação	38
3.1.3. Tempestades	41
3.1.3.1. Ocorrência, intensidade e rumos	41
3.1.3.2. Períodos de retorno	43
3.1.4. Sobrelevação do nível do mar	45
3.2. Caracterização morfológica da área de estudo	48
3.2.1. Corpos lagunares	48
3.2.2. Dunas	49
3.2.3. Praia emersa	50
3.2.4. Praia submersa	52
3.2.5. Alterações morfológicas induzidas por ocupação da faixa litoral	56
3.3. Sedimentologia	57
3.3.1. Cordão dunar frontal	58
3.3.2. Praia emersa	59
3.3.2.1. Berma	59
3.3.2.2. Face da praia	60
3.3.3. Praia submersa	63
3.4. Evolução recente da linha de costa	64

## PARTE II - TRANSFORMAÇÃO DA AGITAÇÃO INCIDENTE

4. Transformação da altura da onda incidente sobre barras submersas	71
4.1. Introdução e conceitos teóricas	71
4.2. Estudos prévios	73
4.3. Resultados (Campanha Tocha 92)	78
4.4. Discussão	80
4.5. Síntese	87
5. Dissipação da energia da onda na rebentação	89
5.1. Introdução e conceitos teóricos	89
5.2. Estudos prévios	90
5.3. Resultados	92
5.4. Discussão	94
5.4.1. Dissipação de energia por rebentação	94
5.4.2. Efeito da sobrelevação do nível do mar	96
5.5. Síntese	100

6. Medição e previsão de níveis de “runup”	102
6.1. Introdução e conceitos teóricos	102
6.2. Estudos prévios	103
6.3. Resultados	109
6.4. Discussão	113
6.4.1. Distribuição dos níveis de “runup”	113
6.4.2. Previsão dos níveis máximos de “runup”	114
6.5. Síntese	121

### PARTE III - MORFODINÂMICA

7. Estudos morfodinâmicos de macroescala	125
7.1. Introdução	125
7.2. Métodos	126
7.2.1. Morfologia e volumetria	126
7.2.2. Parâmetros morfodinâmicos	128
7.3. Agitação marítima ao largo	129
7.4. Caracterização morfodinâmica	131
7.4.1. Morfodinâmica da barra externa	134
7.4.1.1. Tipo de rebentação	134
7.4.1.2. Comportamento da face da barra externa	135
7.4.2. Morfodinâmica da barra interna	136
7.4.2.1. Tipo de rebentação	137
7.4.2.2. Comportamento da face da barra interna	138
7.4.3. Morfodinâmica da face da praia	139
7.4.3.1. Tipo de rebentação	140
7.4.3.2. Comportamento da face da praia	141
7.4.4. Integração morfodinâmica	142
7.5. Variabilidade morfológica e volumétrica da praia emersa	146
7.5.1. Volumes sedimentares (“stocks”) da praia emersa	146
7.5.2. Variabilidade entre períodos de observação	151
7.5.3. Comportamento comparado entre praias	153
7.5.4. Variabilidade volumétrica das bermas	154
7.6. Índices de vulnerabilidade morfológica	157
7.6.1. Introdução e conceitos	157
7.6.2. Aplicação do índice	158
7.6.2.1. Aplicação à Praia de Faro	159
7.6.2.2. Aplicação aos dados de Aveiro-Cabo Mondego	161
7.6.3. Avaliação do índice de vulnerabilidade morfológica	163
7.6.4. O índice do momento	167
7.6.4.1. Aplicação à Praia de Faro	168
7.6.4.2. Aplicação ao sector Aveiro-Cabo Mondego	169
7.7. Máxima variação vertical	170
7.8. Erosão <i>versus</i> acreção (transição barra/berma)	175
7.8.1. Conceitos teóricos	175
7.8.2. Aplicação à área de estudo	180
7.9. Síntese	183
7.9.1. Caracterização morfodinâmica	183

7.9.2. Variabilidade morfológica e volumétrica da praia emersa	184
7.9.3. Índices de vulnerabilidade morfológica	185
7.9.4. Máxima variação vertical	186
7.9.5. Transição perfil de barra/perfil de berma	187
8. Estudos morfológicos de mesoescala - Parte I (Variações diárias)	188
8.1. Introdução	188
8.2. Resultados das campanhas	188
8.2.1. Condições oceanográficas	188
8.2.2. Morfologia e volumetria	190
8.3. Parâmetros morfodinâmicos	195
8.4. Transição barra/berma (erosão <i>versus</i> acreção)	197
8.4.1. Análise das variações morfológicas diárias	197
8.4.2. Variações volumétricas <i>versus</i> previsões	203
8.4.3. Comportamento do perfil <i>versus</i> previsões	206
8.4.4. Comparação mesoescala-macroescala e limites propostos	211
8.5. Altura da berma	213
8.5.1. Introdução e conceitos teóricos	213
8.5.2. Resultados	215
8.5.3. Discussão	217
8.6. Declive da face da praia	222
8.6.1. Introdução e conceitos teóricos	222
8.6.2. Aplicação à área de estudo	226
8.6.3. Comparação mesoescala-macroescala	231
8.7. Profundidade de mistura	232
8.7.1. Introdução e conceitos teóricos	232
8.7.2. Métodos	234
8.7.3. Resultados	235
8.7.4. Discussão	236
8.7.5. Aplicação ao sector costeiro Aveiro-Cabo Mondego	240
8.8. Síntese	241
8.8.1. Variações volumétricas	241
8.8.2. Transição barra/berma	242
8.8.3. Altura da berma	243
8.8.4. Declive da face da praia	244
8.8.5. Profundidade de mistura	245
9. Estudos morfológicos de mesoescala - Parte II (Efeito de temporais)	247
9.1. Introdução e conceitos teóricos	247
9.1.1. Importância, actuação e efeitos de tempestades	247
9.1.2. Métodos de determinação de erosão de praias e dunas por tempestades	251
9.1.3. Modelo MSBWT	257
9.1.3.1. Descrição do modelo	257
9.1.3.2. Análise crítica do modelo	260
9.1.4. Modelo de convolução de Kriebel e Dean	261
9.1.4.1. Descrição do modelo	261

9.1.4.2. Análise crítica do modelo	267
9.2. Validação dos modelos	268
9.2.1. Tempestade de 24 a 27 de Fevereiro de 1989	269
9.2.1.1 Modelo MSBWT	272
9.2.1.2. Modelo de convolução	275
9.2.2. Tempestade de 16 de Dezembro de 1992	279
9.2.2.1 Modelo MSBWT	280
9.2.2.2. Modelo de convolução	282
9.2.3. Avaliação global dos modelos	285
9.2.3.1 Modelo MSBWT	286
9.2.3.2. Modelo de convolução	288
9.3. Aplicações dos modelos a casos hipotéticos	289
9.3.1. Características das praias	290
9.3.2. Temporal médio	291
9.3.2.1. Características do temporal	291
9.3.2.2. Aplicação do modelo MSBWT	293
9.3.2.3. Aplicação do modelo de convolução	294
9.3.2.4. Comparação entre modelos	296
9.3.2.5. Avaliação de impactes	296
9.3.3. Tempestade centenária ou secular	297
9.3.3.1. Características da tempestade	297
9.3.3.2. Aplicação do modelo MSBWT	298
9.3.3.3. Aplicação do modelo de convolução	299
9.3.3.4. Comparação entre modelos	302
9.3.3.5. Avaliação de impactes	302
9.4. Síntese	303

#### PARTE IV - SÚMULA

10. Considerações finais	309
10.1. Análise estrutural	309
10.2. Apresentação de resultados e lacunas	310
10.2.1. Transformação da altura das ondas	310
10.2.2. Dissipação da energia das ondas	311
10.2.3. Níveis de "runup"	312
10.2.4. Morfodinâmica de macroescala	313
10.2.5. Morfodinâmica de mesoescala (variações diárias)	315
10.2.6. Morfodinâmica de mesoescala (temporais)	317
Referências bibliográficas	323

## Índice de figuras

	página
Capítulo 1	
Figura 1.1. Localização da área de estudo, o sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego.	3
Figura 1.2. Localização das praias algarvias onde se efectuaram campanhas complementares.	4
Capítulo 2	
Figura 2.1. Localização dos perfis ocupados nas campanhas VASA.	17
Figura 2.2. Relação entre valores de altura da onda na rebentação, estimados visualmente e previstos por formulações.	25
Figura 2.3. Comparação entre os valores estimados pelos observadores permanentes e não-permanentes.	27
Figura 2.4. Disposição das estacas para observações de "runup" em Areão 95, no dia 11 de Abril.	30
Figura 2.5. Registo típico de "runup", obtido na campanha Areão 95.	31
Figura 2.6. Registo de "runup" da campanha Tocha 92, evidenciando periodicidade nos níveis máximos atingidos, devido a sobreposição de ondas.	31
Capítulo 3	
Figura 3.1. Morfologia da praia emersa (Praia de Quiaios).	51
Figura 3.2. Exemplos de perfis de barra externa, de transição e de "corredor".	54
Figura 3.3. Comparação da distribuição espacial da média granulométrica das amostras colhidas no cordão dunar frontal.	59
Figura 3.4. Comparação da distribuição espacial da média granulométrica das amostras colhidas na berma.	60
Figura 3.5. Comparação da distribuição espacial da média granulométrica das amostras colhidas na face da praia.	62
Figura 3.6. Comportamento previsto da média granulométrica com o afastamento à costa, para um perfil com limite de barra externa a 1000m da origem (crista dunar).	64
Figura 3.7. Evolução temporal da taxa média de migração da linha de costa, para a totalidade do troço Barra - Cabo Mondego (adaptado de Teixeira, 1994). Os valores negativos indicam erosão e os positivos acreção.	66

## Capítulo 4

- Figura 4.1. Atenuação da altura das ondas entre rebentações: a) Relação entre alturas de ondas na barra externa e na barra interna; b) Relação entre alturas de ondas na barra externa e na face da praia. RI. rebentação incompleta; RS. rebentação significativa. 81
- Figura 4.2. Comparação entre as relações de  $H_{b2}/H_{b1}$  observadas e previstas por três métodos. 84
- Figura 4.3. Comparação entre as relações de  $H_{b2}/H_{b1}$  observadas e previstas após calibração dos métodos. 86

## Capítulo 5

- Figura 5.1. Representação gráfica do melhor ajuste entre  $T_{D1,3}$  e  $\Lambda$ , para os dados de Tocha 92. 95
- Figura 5.2. Relação entre a altura crítica ( $H_{bi}$ ) e a energia residual não dissipada ( $E_m$ ), para diferentes valores de sobrelevação (S). 98
- Figura 5.3. Comparação entre o comportamento das curvas de dissipação relativa de energia com e sem sobrelevação. 99

## Capítulo 6

- Figura 6.1. Perfil tipo da praia emersa e submersa em Palheiros da Tocha. 110
- Figura 6.2. Perfil tipo da praia emersa e submersa para Praia do Areão. 112
- Figura 6.3. Comparação entre os dados de  $R_{max}$  obtidos e previstos por formulações, para Tocha 92 e Areão 95, utilizando  $H_o$ . A linha a negro indica o ajuste perfeito. 115
- Figura 6.4. Comparação entre os dados de  $R_{max}$  obtidos e previstos por formulações, para Tocha 92 e Areão 95, utilizando  $H_{b3}$ . A linha a negro indica o ajuste perfeito. 116
- Figura 6.5. Comparação entre os dados e as formulações obtidas. a) determinação de  $c$ ; b) determinação de  $c'$ . 117
- Figura 6.6. Intervalo de variação de níveis máximos de “runup” para tempestades com períodos de retorno entre 1 e 100 anos, admitindo condições médias para a área de estudo. 121

## Capítulo 7

- Figura 7.1. Representação esquemática dos limites utilizados no cálculo de volumes. 127
- Figura 7.2. Esquema de separação de sectores para cálculo de pendores específicos e comparação com pendor médio. FBE = face da barra externa, FBI = face da barra interna, FP = face da praia; NMM = nível médio do mar. 132
- Figura 7.3. Variação longitudinal do pendor da face da praia e linhas de tendência ajustadas a

cada dos declives representados.	133
Figura 7.4. Variação do tipo de rebentação na face da barra externa, em função da agitação, com indicação dos limites entre os tipos mergulhante e progressivo, para condições ao largo e na rebentação.	135
Figura 7.5. Comportamento da face da barra externa em função das condições da agitação.	136
Figura 7.6. Variação do tipo de rebentação sobre a barra interna, de acordo com a altura e período da onda.	138
Figura 7.7. Variação no comportamento da face da barra interna, de acordo com a altura e período da onda.	139
Figura 7.8. Variação do tipo de rebentação na face da praia de acordo com a variação na altura da onda.	141
Figura 7.9. Comportamento da face da praia em função da altura e do período da onda.	142
Figura 7.10. Condições de rebentação para a Situação B, por sectores. FBE - Face da barra externa; FBI - Face da barra interna; FP - Face da praia.	144
Figura 7.11. Comportamento morfodinâmico dos vários sectores da praia, na área de estudo, de acordo com a Situação B.	145
Figura 7.12. Tipo de rebentação nos sectores de praia considerados para a Situação C.	145
Figura 7.13. Comportamento morfodinâmico da praia, por sectores, na área de estudo, para as condições da Situação C.	146
Figura 7.14. Perfis efectuados na área de estudo no período Set 92/Jun 93, referidos ao ZH.	147
Figura 7.15. Variação longilitoral do volume sedimentar ao longo da área de estudo. As setas verticais indicam a localização relativa dos esporões.	150
Figura 7.16. Representação esquemática dos volumes calculados para praias com uma berma (gráfico superior) e com duas bermas (gráfico inferior).	155
Figura 7.17. Variação longilitoral do volume da berma na área de estudo.	156
Figura 7.18. Variação da taxa de incremento em função do número de pontos utilizado para cada cálculo de $I_v$ , para a Praia de Faro.	159
Figura 7.19. Variação do índice para os locais B e E da Praia de Faro, desde o período inicial (meses 11 a 13) até ao período final (meses 13 a 25).	160
Figura 7.20. Variabilidade do índice no período de análise, para cada local da Praia de Faro, e sua relação com o limite empírico.	161
Figura 7.21. Variação longilitoral de $I_v$ entre Praia de Quiaios (PQ) e Vagueira Norte (VN).	161
Figura 7.22. Relação entre $I_v$ e a evolução da linha de costa em Aveiro - Cabo Mondego, com indicação da recta de ajuste (os valores negativos representam erosão).	162
Figura 7.23. Comparação, local a local, dos perfis médios (Set 92/Jun 93) com o perfil obtido em Abril de 1995, referidos ao Zero Hidrográfico.	164
Figura 7.24. Máxima variação vertical obtida para o conjunto de levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993. Perfis referidos ao ZH.	171

Figura 7.25. Relação entre $\Delta D$ e $I_v$ , para as praias analisadas.	175
Figura 7.26. Relação entre $\bar{H}_{3,0}$ e a variação volumétrica para levantamentos consecutivos referentes ao conjunto de dados obtidos na área de estudo.	181

## Capítulo 8

Figura 8.1. Evolução diária do perfil Tocha 0 durante a campanha Tocha 92 (cotas referidas ao ZH).	194
Figura 8.2. Evolução diária do perfil Areão C na campanha Areão 95 (cotas referidas ao ZH).	195
Figura 8.3. Tipo de rebentação prevista no decorrer de cada experiência, sobre a face da praia.	196
Figura 8.4. Variação prevista do comportamento da face da praia nas campanhas Tocha 92 e Areão 95, de acordo com o parâmetro $\epsilon$ .	196
Figura 8.5. Variação do comportamento da face da praia nas campanhas Tocha 92 e Areão 95, de acordo com o parâmetro $\Omega$ .	197
Figura 8.6. Evolução do perfil entre 28 e 30 de Novembro de 1992 (cotas referidas ao ZH).	198
Figura 8.7. Evolução do perfil entre 1 e 5 de Dezembro de 1992 (cotas referidas ao ZH).	199
Figura 8.8. Evolução do perfil entre 6 e 11 de Dezembro (cotas referidas ao ZH).	200
Figura 8.9. Evolução do perfil entre 13 e 15 de Dezembro de 1992, para situação de crista de "beach cusp" (cotas referidas ao ZH).	200
Figura 8.10. Evolução do perfil entre 13 e 15 de Dezembro de 1992, para uma situação de cava de "beach cusp" (cotas referidas ao ZH).	201
Figura 8.11. Evolução do perfil entre 15 e 16 de Dezembro de 1992 (cotas referidas ao ZH).	202
Figura 8.12. Variação do perfil entre 12 e 17 de Abril de 1995, em Praia do Areão (cotas referidas ao ZH).	203
Figura 8.13. Comparação entre tendências volumétricas de erosão/acreção reais e as previstas pelos vários métodos testados. AA' e EE' indicam concordância entre previsões e observações de campo. AE' e EA' indicam diferenças entre previsões e observações. NM = Inexistência de movimento.	205
Figura 8.14. Avaliação dos limites de cada método relativamente aos dados obtidos e propostas de novos ajustes (linhas grossas).	210
Figura 8.15. Variação do perfil de praia e da cota da berma entre os dias 11, 15 e 16 de Dezembro de 1992, no perfil Tocha 50S.	216
Figura 8.16. Relação entre a cota da berma observada e a altura da onda incidente, ao largo.	218
Figura 8.17. Comparação entre cotas da crista da berma previstas e observadas, utilizando a formulação de Takeda e Sunamura, sem alterações.	219
Figura 8.18. Comparação entre cotas da crista da berma previstas e observadas, utilizando a equação 8.5 (baseada na alteração da formulação 8.3).	220
Figura 8.19. Comparação entre o valor de $A'$ ( $A' = 0,125$ ) proposto por Takeda e Sunamura e o	

melhor ajuste obtido ( $A' = 0.131$ , a cheio).	220
Figura 8.20. Comparação entre cotas da crista da berma previstas e observadas, utilizando as equações 8.6 e 8.7.	222
Figura 8.21. Relação directa entre declive da face da praia e diâmetro médio do grão, de acordo com Komar (1976).	224
Figura 8.22. Relação entre o parâmetro adimensional e o declive da praia para condições de agitação na face da praia.	228
Figura 8.23. Relação entre o parâmetro adimensional e o declive da praia para condições de agitação na primeira linha de rebentação.	229
Figura 8.24. Melhor ajuste aos dados obtidos, para condições de agitação relativas à primeira linha de rebentação, utilizando o parâmetro adimensional de Sunamura.	230
Figura 8.25. Melhor ajuste aos dados obtidos, para alturas de onda ao largo, utilizando o parâmetro adimensional de Sunamura.	230
Figura 8.26. Relação entre $Z_m$ e $H_{bs}$ para os dados obtidos.	237
Figura 8.27. Relação entre $Z_{max}$ e $H_{bs}$ para os dados obtidos.	238
Figura 8.28. Comparação entre a formulação 8.18 e a equação de Kraus <i>et al.</i> (1982), sobrepostas aos dados existentes.	238
Figura 8.29. Relação entre $Z_m$ e $H_{bs}\tan\beta$ para os dados das tabelas 8.11. e 8.12..	239
Figura 8.30. Relação entre $Z_{max}$ e $H_{bs}\tan\beta$ para os dados das tabelas 8.11. e 8.12..	240

## Capítulo 9

Figura 9.1. Exemplo de aplicação do modelo MSBWT, para determinação do perfil de tempestade (adaptado de Balsillie, 1997); NMM = nível médio do mar, S' = maré astronómica + sobre-elevação meteorológica.	260
Figura 9.2. Tipos de resposta de perfis: a) perfil de equilíbrio com berma quadrada; b) perfil de equilíbrio com pendor uniforme da face da praia; c) perfil de equilíbrio com dunas e d) perfil de equilíbrio com berma e dunas (adaptado de Kriebel e Dean, 1993). NMM = Nível médio do mar; S' = maré astronómica + sobre-elevação meteorológica.	263
Figura 9.3. Representação gráfica da relação $R_t/R_\infty$ , indicando-se o valor de $R_{max}/R_\infty$ para três casos hipotéticos.	266
Figura 9.4. Perfis ante e pós-tempestade de Fevereiro de 1989 (cotas referidas ao ZH).	271
Figura 9.5. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo MSBWT e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Fevereiro de 1989.	274
Figura 9.6. Representação da variação do tempo de resposta de cada perfil para o temporal de Fevereiro de 1989, para cada perfil considerado.	277
Figura 9.7. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo de convolução e os perfis obtidos no campo, para o temporal de Fevereiro de 1989.	278

<b>Figura 9.8.</b> Representação comparada entre os perfis pós-tempestade do modelo MSBWT e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Dezembro de 1992.	281
<b>Figura 9.9.</b> Representação da variação do tempo de resposta de cada perfil para o temporal de Dezembro de 1992.	283
<b>Figura 9.10.</b> Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo de convolução e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Dezembro de 1992.	285
<b>Figura 9.11.</b> Comparação entre previsões de perfis finais obtidos por aplicação do modelo MSBWT original e modificado e comparação com os perfis observados.	288
<b>Figura 9.12.</b> Perfis pós-tempestade previstos pelo modelo MSBWT modificado para uma tempestade média hipotética. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação inicial de Verão; M' - Perfil final previsto para situação inicial Média. PMN - Praia de Mira Norte; PA - Praia do Areão.	293
<b>Figura 9.13.</b> Perfis pós-tempestade previstos pelo modelo de convolução para a tempestade média. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação de Verão; M' - Perfil final previsto para situação Média.	295
<b>Figura 9.14.</b> - Comparação entre os perfis de erosão previstos pelos dois métodos para uma tempestade média, em Praia de Mira Norte com situação inicial de Verão (V).	296
<b>Figura 9.15.</b> Perfil pós-tempestade previsto pelo modelo MSBWT modificado para a tempestade secular hipotética. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação inicial de Verão.	299
<b>Figura 9.16.</b> Perfis pós-tempestade previstos pelo modelo de convolução para a tempestade secular. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação de Verão; M' - Perfil final previsto para situação Média.	301

## Índice de tabelas

	página
Capítulo 2	
Tabela 2. 1. Súmula das campanhas MOLICEIRO efectuadas e dos perfis obtidos.	9
Tabela 2.2. Súmula do tipo e quantidade de dados obtidos na campanha Tocha 92.	11
Tabela 2.3. Tipo e quantidade de dados adquiridos em Areão 95.	13
Tabela 2.4. Conjunto de alturas de ondas estimadas visualmente em Areão 95. OF, JM, SM, CL, IS e PM são os observadores.	27
Tabela 2.5. Desvios máximos registados entre observadores e relativamente à média.	27
Capítulo 3	
Tabela 3.1. Resumo dos valores médios e modais anuais dos parâmetros de agitação na Figueira da Foz.	38
Tabela 3.2. Resumo dos valores anuais da altura da agitação na área em estudo.	40
Tabela 3.3. Valores de $H_{smax}$ (em metros) associados a diferentes períodos de retorno, para Sines e Cabo da Roca (Pires e Pessanha, 1986a,b).	44
Tabela 3.4. Períodos de retorno associados a valores de $H_{smax}$ para a costa oeste portuguesa de acordo com Ferreira (1993).	44
Tabela 3.5. Valores de $H_{smax}$ e de $H_{max}$ (em metros) associados a diferentes períodos de retorno, para a Figueira da Foz (Carvalho, 1992).	45
Tabela 3.6. Níveis máximos e mínimos de sobre-elevação significativa para a globalidade das estações observadas e para a estação de Aveiro (Gama <i>et al.</i> , 1994a).	46
Tabela 3.7. Elevação do nível do mar acima do ZH (cm), para os períodos de retorno associados (Gama <i>et al.</i> , 1994b).	47
Tabela 3.8. Taxas de evolução recente da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego (m/ano). Nota: Valores negativos indicam recuo e positivos acreção.	65
Capítulo 4	
Tabela 4.1. Valores de altura das ondas nas várias linhas de rebentação, relações de atenuação da altura para cada conjunto de ondas e classificação de rebentação significativa ou incompleta, na 1ª (Grupo 1) e na 2ª (Grupo 2) linhas de rebentação, para Tocha 92.	80
Tabela 4.2. Relações entre $\bar{H}_r$ (altura média da onda reformada) e $\bar{H}_{bi}$ (altura média da onda na rebentação anterior à reformação; no caso em estudo $i$ pode tomar os valores 1 e 2), de acordo com vários autores.	82

## Capítulo 5

Tabela 5.1. Súmula dos valores de energia e de dissipação de energia entre rebentações para a campanha Tocha 92.	93
Tabela 5.2. Comparação de taxas de dissipação de energia (min/med/max) entre linhas com rebentação completa para os dados de Tocha 92 e Lough Neagh.	94
Tabela 5.3. Valores de $E_{im}$ ( $\text{kJ/m}^2$ ) para diferentes condições de sobrelevação (S) e de alturas de rebentação críticas ( $H_{bi}$ ).	98

## Capítulo 6

Tabela 6.1. Valores de pendor de praia, altura de onda significativa e período de pico ao largo e níveis máximos, significativos e médios de "runup".	112
Tabela 6.2. Relações entre os vários níveis de "runup" determinados.	113
Tabela 6.3. Valores de $R_{max}$ (m) esperados para um temporal com período de retorno de 5 anos ( $H_{so} = 10\text{m}$ ), para várias condições de período de pico e pendor da face da praia.	119
Tabela 6.4. Cotas do topo do cordão dunar, em metros, referidas ao Zero Hidrográfico, entre Costa Nova do Prado e Quiaios (valores obtidos com base nas Cartas Topográficas do Exército, 1: 25 000).	120

## Capítulo 7

Tabela 7.1. Valores limite para os índices morfodinâmicos, de acordo com vários autores.	129
Tabela 7.2. Valores médios mensais de $H_{so}$ , $T_p$ e $D_o$ , para a Figueira da Foz.	130
Tabela 7.3. Valores médios de agitação ao largo na Figueira da Foz, para os intervalos entre levantamentos.	130
Tabela 7.4. Pendores das faces da barra externa, barra interna e praia emersa por local e para a totalidade da área de estudo.	133
Tabela 7.5. Variação do "surf similarity parameter" em função de $H_b$ e de $T_p$ , para as praias com declives médios mais afastados.	141
Tabela 7.6. Variações dos parâmetros $\epsilon$ e $\Omega$ em função de $H_b$ e de $T$ , para as praias com declives médios mais afastados.	142
Tabela 7.7. Valores utilizados em cada cenário, para a integração morfodinâmica.	143
Tabela 7.8. Comportamento morfodinâmico da área de estudo para condições médias anuais, de acordo com a Situação A.	144
Tabela 7.9. Volumes sedimentares em cada levantamento, volume médio e máxima diferença	

entre levantamentos, para a área de estudo, em m <sup>3</sup> /m. NE - Não efectuado	149
Tabela 7.10. Diferença volumétrica entre levantamentos consecutivos (os valores negativos indicam erosão e os positivos acreção).	151
Tabela 7.11. Matriz de correlação da variação volumétrica entre locais estudados.	153
Tabela 7.12. Volumes da berma por levantamento; volume médio e máxima diferença para cada local.	156
Tabela 7.13. Valores de I <sub>V</sub> para a Praia de Faro.	160
Tabela 7.14. Diferença volumétrica e máximo recuo da duna entre os perfis médios de Set 92/Jun 93 e os perfis de Abril de 1995, para a área de estudo.	163
Tabela 7.15. Valores de I <sub>M</sub> para a Praia de Faro, para Julho 96 (V 96) e Dezembro 96 (I 96).	168
Tabela 7.16. Valores de I <sub>M</sub> para a Praia de Faro, após a tempestade de Janeiro de 1998.	169
Tabela 7.17. Valores de I <sub>M</sub> para as praias do sector Aveiro - Cabo Mondego, para Fevereiro e Junho de 1993.	169
Tabela 7.18. Resultados da aplicação dos critérios para separação entre a formação de perfil de barra ou perfil de berma e comparação entre os limites teóricos e os limites obtidos para a área de estudo.	182
 Capítulo 8	
Tabela 8.1. Dados de agitação para a experiência Areão 95. T <sub>b</sub> = período médio das ondas na rebentação.	189
Tabela 8.2. Dados de agitação para a experiência Tocha 92. T <sub>po</sub> = período de pico ao largo; T <sub>b2</sub> = período médio das ondas na 2ª linha de rebentação; T <sub>b3</sub> = período médio das ondas na 3ª linha de rebentação. ND = Não determinado.	190
Tabela 8.3. Pendores da face da praia para as experiências Tocha 92 e Areão 95. ND = Não determinado.	191
Tabela 8.4. Cota da crista da berma referida ao Zero Hidrográfico, em metros, para os dados das experiências Tocha 92 e Areão 95. ND = Não determinado.	192
Tabela 8.5. Variação volumétrica acima do NMM, em m <sup>3</sup> /m, entre levantamentos consecutivos, para as experiências Tocha 92 e Areão 95. ND = Não determinado.	193
Tabela 8.6. Valores utilizados no cálculo dos parâmetros relativos à separação entre tendências de acreção ou erosão.	204
Tabela 8.7. Comportamento observado e previsto entre levantamentos consecutivos. Be - Berma; Ba - Barra; E - Estável; E/Be - Estável/Berma; E/Ba - Estável/Barra. Os asteriscos indicam as situações onde o comportamento observado e o comportamento previsto não é coincidente, para cada método utilizado.	208
Tabela 8.8. Limites de comportamento barra/berma, propostos na literatura e calculados à meso e macroescala para a área em questão.	212

Tabela 8.9. Valores de agitação, maré e morfologia utilizados na determinação da altura prevista da berma e valores observados da cota média do topo da berma ( $B_h$ real). $M$ = Nível de maré actuante; $H_{s0}$ = Altura significativa da onda ao largo; $H_{b1}$ = Altura da onda na primeira linha de rebentação, estimada visualmente; $H_{b3}$ = Altura da onda na terceira linha de rebentação, estimada visualmente; $T_{po}$ = Período de pico, ao largo; $\tan\beta$ = Declive da face da praia.	217
Tabela 8.10. Dados de agitação, granulometria e declive da face da praia utilizados na aplicação da formulação de Sunamura (1984).	228
Tabela 8.11. Altura da onda, pendor da face da praia e profundidades de mistura médias e máximas para as campanhas analisadas.	236
Tabela 8.12. Altura da onda, pendor da face da praia e profundidades de mistura médias e máximas para as campanhas descritas na literatura. a = valor não referido pelos autores.	239

## Capítulo 9

Tabela 9.1. Volumes de erosão previstos pelo modelo MSBWT para a tempestade de Fevereiro de 1989.	273
Tabela 9.2. Volumes ( $m^3/m$ ) de erosão das praias analisadas, para a tempestade de Fevereiro de 1989.	273
Tabela 9.3. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão medidos e previstos pelo modelo MSBWT, para a tempestade de Fevereiro de 1989.	274
Tabela 9.4. Dados morfológicos e da tempestade necessários para a aplicação do modelo de convolução à tempestade de Fevereiro de 1989, na área de estudo.	276
Tabela 9.5. Valores de recuo e volume estimados pelo método de convolução para o temporal de Fevereiro de 1989, para diferentes locais.	277
Tabela 9.6. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão verificados e previstos pelo modelo de convolução, para a tempestade de Fevereiro de 1989, em diferentes locais.	277
Tabela 9.7. Volumes de erosão previstos pelo modelo MSBWT para a tempestade de Dezembro de 1992.	280
Tabela 9.8. Volumes ( $m^3/m$ ) de erosão das praias analisadas, para a tempestade de Dezembro de 1992.	280
Tabela 9.9. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão verificados e previstos pelo modelo MSBWT, para a tempestade de Dezembro de 1992.	281
Tabela 9.10. Dados morfológicos e da tempestade necessários para a aplicação do modelo de convolução à tempestade de Dezembro de 1992.	282
Tabela 9.11. Valores de recuo e volume estimados pelo método de convolução para a tempestade de Dezembro de 1992.	283
Tabela 9.12. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão verificados e previstos pelo modelo de convolução, para o temporal de Dezembro de 1992.	284

<b>Tabela 9.13.</b> Comparação de previsão de volumes médios ( $m^3/m$ ), entre modelos.	286
<b>Tabela 9.14.</b> Valores de $\tan\beta$ , B, W e D utilizados nas aplicações dos modelos a casos hipotéticos.	291
<b>Tabela 9.15.</b> Valores de $R_{max}$ e $V_{Mmax}$ previstos pelo modelo de convolução para uma tempestade média hipotética, em cinco perfis seleccionados.	294
<b>Tabela 9.16.</b> Valores de $R_{max}$ e $V_{Mmax}$ previstos pelo modelo de convolução para uma tempestade secular hipotética, em cinco locais seleccionados.	300

## Lista de símbolos

$a$	coeficiente empírico
$a_i$	amplitude da onda incidente
$a_s$	coeficiente de forma
$A$	coeficiente empírico
$A$	coeficiente empírico
$A'$	coeficiente empírico
$b$	coeficiente empírico
$b$	coeficiente empírico
$B$	distância da origem ao limite externo da barra/distância da amostra à origem
$B$	elevação da berma acima do nível médio do mar
$B_h$	elevação da berma acima do nível da água
$c$	coeficiente empírico
$c$	coeficiente empírico
$c'$	coeficiente empírico
$C$	velocidade da onda
$C_1$	coeficiente empírico
$C_{bi}$	velocidade da onda na primeira rebentação
$d$	profundidade da água
$d_b$	profundidade da água na rebentação
$d_c$	profundidade da água na crista da barreira, barra ou obstáculo submerso
$d_{c1}$	profundidade da água na primeira linha de rebentação
$d_{c2}$	profundidade da água na segunda linha de rebentação
$d_i$	profundidade da água na cava da barreira, barra ou obstáculo submerso
$D$	altura da duna
$D_{eb}$	parâmetro equivalente da declividade da onda
$D_o$	rumo da onda ao largo
$D_{50}$	diâmetro médio do sedimento
$E$	energia da onda
$E_{bi}$	energia da onda na linha de rebentação $i$
$E_{bi+x}$	energia da onda na linha de rebentação $i+x$

$E_{ci}$	energia da onda com altura crítica, na linha de rebentação $i$
$E_{cin}$	energia da onda com altura crítica modificada, na linha de rebentação $i$
$E_D$	energia dissipada
$E_{D(i+x)}$	energia dissipada entre as linhas de rebentação $i$ e $i+x$
$E_{im}$	energia residual não dissipada por acção de sobrelevação, na linha de rebentação $i$
$g$	aceleração gravítica
$h_{bc}$	altura da barreira ou do obstáculo submerso
$H$	altura da onda
$\bar{H}$	altura média da onda
$H_b$	altura da onda na rebentação
$\bar{H}_b$	altura média da onda na rebentação
$H_{b1max}$	altura máxima da onda na primeira rebentação
$H_{bi}$	altura da onda na rebentação sobre uma barra inicial
$H_{bmax}$	altura máxima da onda na rebentação
$H_{br}$	altura da onda na rebentação sobre uma barra secundária
$H_{brms}$	altura média quadrática da onda na rebentação
$H_{bs}$	altura significativa da onda na rebentação
$H_{b1}$	altura da onda na primeira linha de rebentação
$H_{b2}$	altura da onda na segunda linha de rebentação
$H_{b3}$	altura da onda na terceira linha de rebentação
$H_{bm}$	altura da onda modificada, na rebentação, por efeito de sobrelevação
$H_{ci}$	altura crítica para a linha de rebentação $i$
$H_{cin}$	altura crítica modificada, para a linha de rebentação $i$ , por efeito de sobrelevação
$H_e$	altura da onda excedida anualmente durante 12h
$H_i$	altura da onda imediatamente antes da rebentação
$H_{imax}$	altura máxima da onda
$H_o$	altura da onda ao largo
$H_r$	altura da onda reformada
$H_{rms}$	altura média quadrática da onda
$H_{rmso}$	altura média quadrática da onda ao largo
$H_s$	altura significativa da onda
$H_{smax}$	máxima altura significativa da onda
$H_{so}$	altura significativa da onda ao largo
$\bar{H}_{so}$	altura significativa média anual da onda ao largo

I	coeficiente empírico
$I_M$	índice do momento
$I_V$	índice de vulnerabilidade morfológica
J	coeficiente empírico
K	coeficiente empírico
$K'$	coeficiente empírico
$L_o$	comprimento da onda ao largo
$L_r$	escala vertical da distribuição do "runup"
M	coeficiente empírico
$M'$	nível do mar na maré alta
$M_z$	média granulométrica
N	coeficiente empírico
P	coeficiente empírico
$P_s$	coeficiente empírico
$Q_{eavg}$	volume médio de erosão acima do nível do mar causado por um temporal
$Q_{emax}$	volume máximo de erosão acima do nível do mar causado por um temporal
$Q'_{eavg}$	volume médio de erosão acima do nível de pico do temporal
$Q'_{emax}$	volume máximo de erosão acima do nível de pico do temporal
R	nível de "runup"
$\bar{R}$	nível médio de "runup"
$R_1$	nível de "runup" excedido por 1% das ocorrências
$R_2$	nível de "runup" excedido por 2% das ocorrências
$R_{max}$	nível máximo de "runup"
$R_{max}$	recuo máximo previsto
$R_s$	nível de "runup" significativo
$R_t$	nível de "runup" total
$R_\infty$	recuo máximo potencial
$R_{\infty B}$	recuo potencial da berma

$R_{\infty D}$	recuo potencial da duna
$S$	nível de sobrelevação (sobrelevação meteorológica)
$S'$	nível de pico ou sobrelevação total (maré astronómica + sobrelevação meteorológica)
$\tan\beta$	declive da face da praia
$\tan\beta'$	declive da praia submersa
$t_m$	tempo a que ocorre a máxima erosão durante uma tempestade
$t_r$	tempo de subida de uma tempestade, até atingir o pico de sobrelevação
$T$	período da onda
$T_b$	período médio da onda na rebentação
$T_{b2}$	período médio da onda na segunda linha de rebentação
$T_{b3}$	período médio da onda na terceira linha da rebentação
$T_D$	duração da tempestade
$T_{Di,i+x}$	taxa de energia dissipada entre as linhas de rebentação $i$ e $i+x$
$T_p$	período de pico da onda
$\bar{T}_p$	período de pico médio anual da onda
$T_{po}$	período de pico da onda ao largo
$T_s$	período significativo da onda
$T_S$	escala temporal de resposta do perfil
$\bar{T}_s$	período significativo médio anual da onda
$T_z$	período médio da onda
$\bar{T}_z$	período médio anual da onda
$V_{max}$	volume máximo dos levantamentos utilizados no cálculo de $I_V$ e $I_M$
$V_{med}$	volume médio dos levantamentos utilizados no cálculo de $I_V$ e $I_M$
$V_{min}$	volume mínimo dos levantamentos utilizados no cálculo de $I_V$ e $I_M$
$V_M$	volume da praia em determinado levantamento
$V_{Mmax}$	volume máximo previsto de erosão da praia e duna, acima do nível médio do mar
$V_{M\infty}$	volume potencial de erosão da praia e duna, acima do nível médio do mar
$V_{M\infty B}$	volume potencial de erosão da berma, acima do nível médio do mar
$V_{Smax}$	volume máximo previsto de erosão da praia e duna, acima do pico de sobrelevação
$V_{S\infty}$	volume potencial de erosão da praia e duna, acima do pico de sobrelevação
$V_{S\infty B}$	volume potencial de erosão da berma, acima do pico de sobrelevação
$V_{\infty}$	volume potencial de erosão
$x$	distância relativa à posição da linha de costa

$x_b$	distância entre a linha de costa e a rebentação
$x_c$	distância entre a linha de costa e a crista da barra
$x_o$	distância entre a linha de costa e a origem virtual do perfil de equilíbrio
$x_t$	distância entre a linha de costa e a cava da barra
$Z_{med}$	profundidade média de mistura
$Z_{max}$	profundidade máxima de mistura
$w_s$	velocidade de sedimentação
$W$	largura da berma
$W_1$	largura da zona de "surf"
$W_{bt}$	largura da zona de rebentação
$\beta$	taxa de erosão esalo-temporal
$\Delta D$	máxima variação vertical anual numa praia
$\varepsilon$	"surf scalling parameter"
$\Lambda$	parâmetro de escala da agitação
$\rho$	peso específico da água
$\Omega$	velocidade de sedimentação adimensional ou "índice de Dean"
$\xi$	número de Iribaren ou "surf similarity parameter"
$\xi_b$	"surf similarity parameter" para condições na rebentação
$\xi_o$	"surf similarity parameter" para condições ao largo
$\omega$	frequência angular da onda incidente



*Estais nas praias. Empregai as longas horas de ócio tão estiradas, tão tediosas, tão enervantes, estudando o mar nos seus fenómenos, nas suas portentosas criações.*

*Ramalho Ortigão ( As Praias de Portugal - Guia do Banhista e do Viajante)*

## **PARTE I**

### **Considerações gerais**



## 1. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

A elaboração desta dissertação é o culminar de um longo ciclo de trabalho, iniciado em finais de 1987, no embrião do actual Grupo DISEPLA. À data, foi-me proposto pelos responsáveis do grupo que efectuassem estudos sobre a dinâmica da zona litoral entre Peniche e Caminha, integrados num projecto mais abrangente de caracterização da dinâmica sedimentar de toda a plataforma continental a norte de Peniche (projecto DISEPLA). No prosseguimento do trabalho aí desenvolvido resultou uma tese de mestrado (Ferreira, 1993), incidindo sobre o sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego (figura 1.1.).

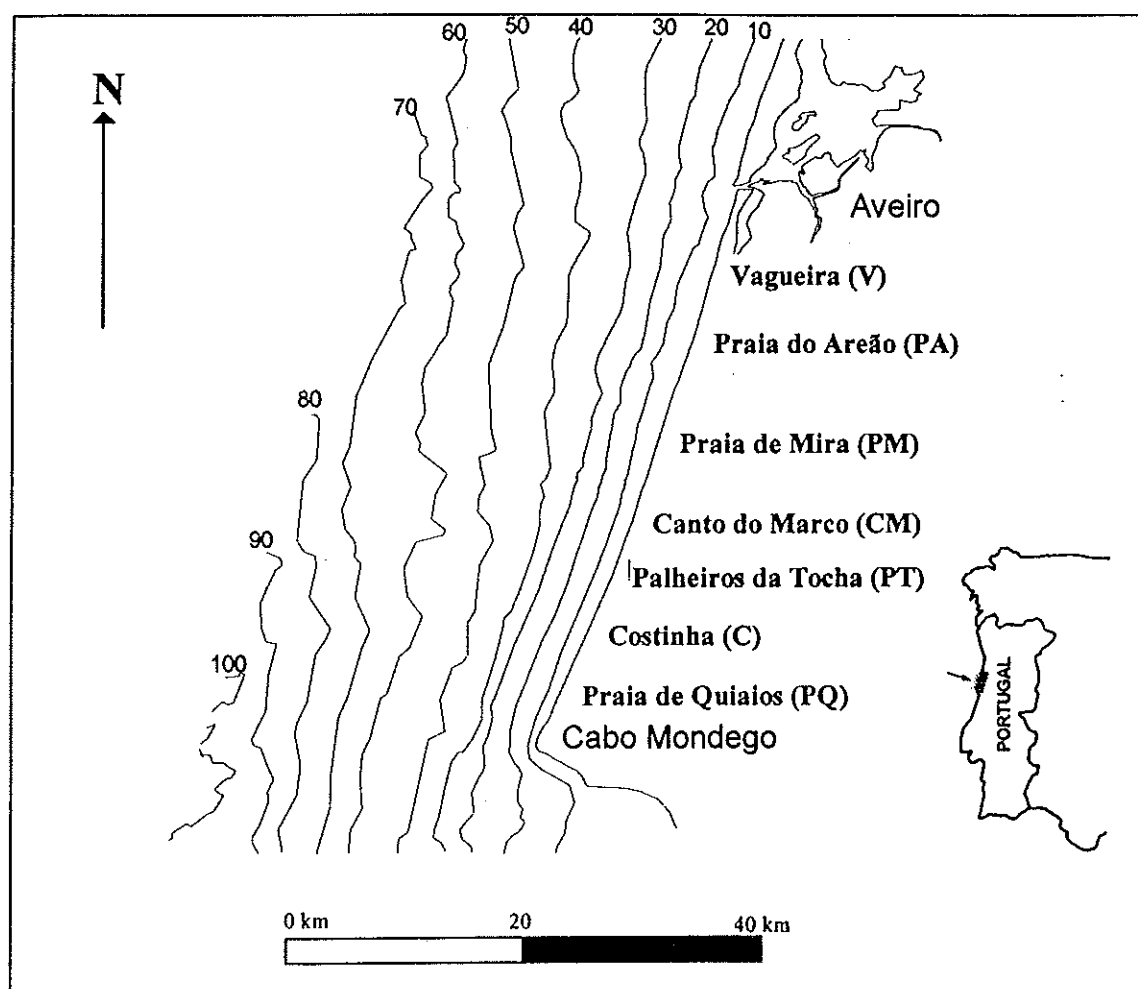


Figura 1.1. Localização da área de estudo, o sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego.

Para a elaboração da tese de doutoramento foi decidido aprofundar conhecimentos sobre a dinâmica litoral, observando-se a variabilidade da costa em função dos parâmetros hidrodinâmicos. Isto é, estudar o litoral visto do mar, em oposição ao que tem sido comum na investigação nacional. Nomeadamente, optou-se

pela obtenção de uma melhor caracterização morfodinâmica e pela determinação das transformações transversais à linha de costa, até então relativamente desconhecidas para a área de estudo. Como principal aliciente a esta temática estava a possibilidade de determinar a variabilidade de praias sujeitas a um regime de agitação muito energético, em média superior aos casos de estudo normalmente apresentados na literatura. Posteriormente, decidiu-se ainda incorporar alguns resultados obtidos em praias do Algarve (figura 1.2.), com regime energético moderado e condições morfodinâmicas diferentes. Tal integração teve como objectivo a ampliação do número de dados, para ambientes distintos, aumentando o leque de aplicação das formulações ou das conclusões obtidas.

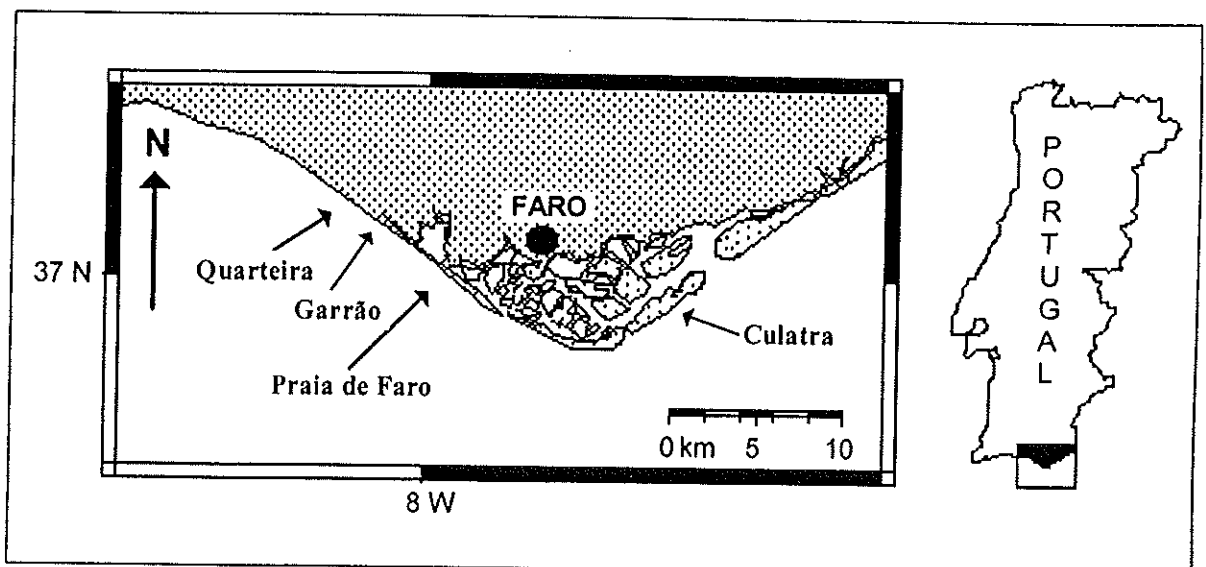


Figura 1.2. Localização das praias algarvias onde se efectuaram campanhas complementares.

Esta tese pode, desta forma, ser encarada como uma continuidade no aprofundar de conhecimento sobre determinada área específica (Aveiro - Cabo Mondego), aproveitando um trabalho de base existente, mas tentando determinar as condicionantes dinâmicas, até então relativamente pouco abordadas. Por outro lado, o estudo de duas áreas com condições energéticas distintas e as conclusões que daí advêm poderão ser interessantes para o conhecimento comparado de locais com características complementares.

No decurso da elaboração desta dissertação, foram efectuadas algumas teses de mestrado (Taborda, 1993; Pinto, 1993; Tomás, 1995; Noivo, 1996; Boto, 1997; Laranjeira, 1997) e uma de doutoramento (Teixeira, 1994) sobre a área principal de

estudo (Aveiro - Cabo Mondego). As teses mencionadas incidem sobre aspectos variados, desde a quantificação da deriva litoral (Taborda, 1993, Teixeira, 1994) ao estudo do comportamento do cordão dunar (Noivo, 1996; Laranjeira, 1997), passando pela caracterização granulométrica (Pinto, 1993; Teixeira, 1994, Tomás, 1995) e pelo estudo do recuo da linha de costa (Teixeira, 1994; Boto, 1997). Estas dissertações raramente abordam aspectos de morfodinâmica e, sobretudo, da sua interligação com as condicionantes hidrodinâmicas, não existindo sobreposição directa com a dissertação agora apresentada, com excepção de pequenas partes dos trabalhos de Teixeira (1994) e de Tomás (1995). Na generalidade, os dados e as conclusões obtidas pelos vários autores supracitados são mencionados no enquadramento geral e utilizados como base de apoio ao longo de vários capítulos.

Os objectivos principais deste trabalho são:

- caracterização da transformação da onda e da energia associada na zona de rebentação e na pré-praia;
- avaliação da influência das barras submersas na transformação da onda incidente;
- determinação dos níveis máximos de actuação atingidos pelo esprai das ondas;
- caracterização da variabilidade morfodinâmica da área de estudo;
- determinação da tendência evolutiva da praia a várias escalas (meso e macroescala);
- caracterização dos limites de separação erosão/acreção ou de perfil barra/berma e sua associação aos parâmetros de agitação;
- definição de parâmetros ou de índices morfológicos simples que permitam caracterizar o comportamento das praias;
- determinação da profundidade de mistura e da sua dependência relativamente a parâmetros de agitação e morfológicos;
- previsão do efeito de tempestades sobre a praia e duna, através da aplicação de modelos numéricos validados.

Por forma a permitir uma leitura esboçada, mas também parcelar, caso desejável, esta dissertação encontra-se separada em quatro partes, possuindo uma estrutura modular.

A primeira parte, de caracterização genérica, visa proporcionar ao leitor uma informação de base sobre o sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego, que permita o prosseguimento da leitura com conhecimento dos principais trabalhos efectuados.

A segunda parte reporta-se à transformação da agitação incidente, desde o empolamento e rebentação inicial, até ao máximo nível atingido na praia. Encontra-se dividida em três capítulos, abordando-se nos dois primeiros a influência das barras submersas na transformação da onda e na dissipação de energia, estando o terceiro dedicado à determinação do nível máximo atingido pelo espraio.

A terceira parte da tese corresponde ao cerne da mesma, estando também dividida em três capítulos. Os dois primeiros reportam-se à caracterização morfodinâmica da praia, a diferentes escalas temporais. O terceiro capítulo particulariza o efeito de uma situação de mesoescala, as tempestades, sobre a praia emersa. São aí testados e aplicados modelos para determinação da erosão associada a tempestades reais e efectuadas previsões de comportamento para tempestades hipotéticas (média e centenária).

Todos os capítulos da segunda e terceira parte englobam uma síntese final, onde se descrevem as principais conclusões obtidas.

A quarta parte da tese corresponde a uma análise do trabalho efectuado, mencionando-se os principais resultados e conclusões, bem como as principais lacunas, permitindo uma integração final dos capítulos anteriores e alguma avaliação face aos objectivos.

Menciona-se, ainda, que serão utilizados nesta dissertação quer termos técnicos em português, quer em inglês, recorrendo-se aos primeiros quando o seu uso já é relativamente generalizado entre os investigadores nacionais e aos segundos quando não há tradução conhecida ou adequada ou quando não há uniformidade de aplicação entre autores.

## 2. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

### 2.1. CAMPANHAS DE CAMPO

Para os objectivos deste trabalho foi prevista a realização de uma série de campanhas de campo, sistemáticas ou pontuais, dependendo do âmbito a que se destinavam. Estas campanhas foram efectuadas com recurso a meios técnicos genericamente simples e o menos dispendiosos possível, dentro daqueles que poderiam fornecer os dados pretendidos sem significativa perda de qualidade. Tal facto ficou a dever-se à impossibilidade de obtenção, à data, de meios técnicos sofisticados (mais onerosos) para promover o trabalho. Por outro lado, a muito elevada dinâmica da área em estudo constitui um risco adicional à utilização de aparelhos de elevado custo, pelo que o recurso a meios simples parece constituir um bom compromisso entre a fiabilidade dos resultados e os encargos financeiros.

Descrevem-se, em seguida, as campanhas realizadas, os objectivos associados e o trabalho efectuado, permitindo obter uma ideia inicial da variedade e da quantidade de dados obtidos. São ainda descritas campanhas que, não tendo sido realizadas na área em estudo nem com o objectivo principal de virem a integrar esta dissertação, recolheram dados adicionais que permitiram uma maior abrangência e consequente melhoria nas conclusões obtidas.

#### 2.1.1. Campanhas MOLICEIRO (MONitorização do LItoral entre o Cabo Mondego e AveIRO)

As campanhas MOLICEIRO integraram-se no âmbito dos projectos PROCOST (JNICT n°714/90) e DISEPLA II (JNICT n°692/90), tendo como objectivos principais:

a) realização de perfis transversais da praia emersa no litoral entre o Cabo Mondego e Aveiro, em período de marés vivas, com recurso à utilização de um teodolito T16, cedido pelo Instituto Hidrográfico;

b) caracterização do estado geral das praias e do cordão dunar frontal, na área em causa.

Foram previamente definidos dez perfis de praias representativas do troço costeiro, englobando praias não influenciadas por estruturas de engenharia costeira e praias afectadas por esse tipo de estruturas. Todos os perfis realizados tiveram a sua origem em local previamente referenciado com uma estaca ou com um marco de cimento, colocado no topo do cordão dunar. Em locais onde este não existia ou estava muito alterado, utilizaram-se como referências construções já existentes (casas, postes, muros, etc.). Os pontos de origem dos perfis estavam, por sua vez, referenciados a pontos interiores (árvores, postes, etc.), por forma a garantir a possibilidade de recuperação do perfil caso a referência da origem fosse destruída por pessoas (o que aconteceu com frequência) ou pelo mar (o que apenas se verificou num caso).

Como garantia acrescida e por forma a obter uma fácil identificação dos locais de origem, foram tirados diapositivos com o alinhamento dos perfis e com o local exacto onde foi estacionado o teodolito, permitindo a fácil recuperação desse local através da observação dos diapositivos, no campo, sempre que as referências fossem destruídas.

Os locais escolhidos para a obtenção de perfis foram os seguintes (figura 1.1.):

- ◆ Praia de Quiaios
- ◆ Costinha
- ◆ Palheiros da Tocha
- ◆ Canto do Marco (Palheirão)
- ◆ Praia de Mira S (a sul do esporão sul)
- ◆ Praia de Mira N (a norte do esporão norte)
- ◆ Praia do Areão
- ◆ Vagueira S (a sul do esporão sul)
- ◆ Vagueira E (entre esporões)
- ◆ Vagueira N (a norte do esporão norte)

Optou-se pela não realização de perfis em locais a norte de Vagueira, ainda que de fácil acesso, por motivos diversos. Em Costa Nova do Prado as praias são praticamente inexistentes, entre esporões pouco espaçados, e com grande influência de estruturas longilitorais (paredões), sendo apenas representativas das condições aí vigentes. Na localidade da Barra, as praias são largas mas dependentes do efeito de sombra, directo, do molhe sul do porto de Aveiro, situação que não acontece no resto

da área em estudo. Assim, entendeu-se que estes dois locais apenas forneceriam indicações relativas a situações pontuais, dificilmente comparáveis com o resto da área em estudo, pelo que foram excluídos do planeamento inicial do trabalho.

Estão discriminadas na tabela 2.1. as campanhas MOLICEIRO efectuadas e os perfis realizados, bem como o dia e a hora da sua obtenção.

**Tabela 2. 1.** Súmula das campanhas MOLICEIRO efectuadas e dos perfis obtidos.

Campanhas MOLICEIRO	1/92	2/92	1/93	2/93	3/93	1/95
<b>PERFIL</b>						
P. Quiaios	25/9/92 19h15m	10/12/92 11h00m	6/2/93 9h10m	20/3/93 9h00m	8/6/93 10h50m	13/4/95 12h50m
Costinha	26/9/92 8h05m	*	6/2/93 10h00m	20/3/93 10h00m	8/6/93 11h40m	*
P. Tocha	26/9/92 9h10m	10/12/92 11h30m	6/2/93 10h45m	20/3/93 10h30m	8/6/93 12h25m	12/4/95 12h15m
C. Marco	26/9/92 10h40m	10/12/92 12h00m	6/2/93 11h30m	20/3/93 11h00m	8/6/93 13h15m	12/4/95 11h15m
P. Mira S	26/9/92 11h10m	10/12/92 12h50m	6/2/93 12h30m	20/3/93 12h00m	8/6/93 14h10m	11/4/95 20h10m
P. Mira N	26/9/92 17h40m	11/12/92 9h50m	7/12/93 10h00m	21/3/93 9h10m	8/6/93 14h50m	11/4/95 19h20m
Areão	27/9/92 8h30m	11/12/92 10h35m	7/12/93 10h30m	21/3/93 9h45m	9/6/93 11h50m	15/4/95 13h30m
Vagueira S	27/9/92 12h00m	11/12/92 11h15m	7/12/93 11h15m	21/3/93 10h20m	9/6/93 12h30m	11/4/95 12h00m
Vagueira E	27/9/92 9h55m	11/12/92 12h15m	7/12/93 11h45m	21/3/93 10h50m	9/6/93 13h00m	10/4/95 18h00m
Vagueira N	27/9/92 11h15m	11/12/92 12h45m	7/12/93 12h15m	21/3/93 11h20m	9/6/93 13h30m	10/4/95 17h40m

\* Não realizado

Não se efectuaram os perfis de Costinha, nas campanhas MOLICEIRO 2/92 e 1/95, devido à impraticabilidade da estrada de acesso ao local do perfil. Ao longo das campanhas iniciais MOLICEIRO foram obtidos 49 perfis respeitantes ao período entre Setembro de 1992 e Junho de 1993, correspondendo a um espaçamento médio entre campanhas de cerca de 2 meses. Na realidade, esse espaçamento variou entre um mês e meio e dois meses e meio, para campanhas consecutivas. Obtiveram-se, ainda, 9 perfis relativos ao levantamento de 1995. Na campanha MOLICEIRO 1/92 (Setembro de 1992) foram recolhidas 41 amostras de sedimento superficial, com vista à caracterização granulométrica das praias em estudo. As amostras recolhidas variaram entre um número de 3 a 6 para cada perfil, dependendo da morfologia. Foram obtidas amostras desde a duna (quando existente) até à face da praia, englobando a alta praia,

berma(s) e cava e crista de sistema lomba - canal, quando existentes.

A determinação das cotas dos perfis relativamente ao Zero Hidrográfico (ZH) foi efectuada da seguinte forma:

i) sempre que a agitação o permitiu o perfil foi prolongado até dentro de água, registando-se a diferença de cotas entre esse ponto e a origem, bem como a altura (medida na régua) ao nível médio estimado da água, nesse momento;

ii) sabendo a maré teórica ou a real (quando disponível) determinou-se a cota da origem relativamente ao ZH, em cada levantamento, tendo por base os níveis medidos na régua e a sua relação com a cota do ponto onde se efectuou a leitura;

iii) calculou-se a média das cotas determinadas para cada local, sendo assumidas como constituindo a cota final relativa ao ZH.

As cotas determinadas desta forma variaram, em média, entre si, cerca de 20 cm a 30 cm, para o mesmo local. Os desvios máximos atingiram os 50 cm. As variações observadas devem-se a incertezas do próprio método, derivadas sobretudo de diferenças entre maré teórica e maré real e de dificuldades impostas pela agitação na determinação do nível médio na régua.

Este procedimento foi igualmente utilizado para as restantes campanhas efectuadas no âmbito desta dissertação. Noutros trabalhos, realizados na Praia de Faro e em Cacela, a comparação de cotas determinadas por este método e por georeferenciação permitiu observar diferenças, em média, de 10-15 cm.

### 2.1.2. Campanha Tocha 92

A campanha Tocha 92 decorreu entre 28/11/92 e 16/12/92, em Palheiros da Tocha (figura 1.1.), tendo sido financiada pelos projectos PROCOST e DISEPLA II. Os objectivos principais da campanha foram:

a) recolha de perfis diários, durante a maré baixa, em cinco locais, utilizando-se para tal um teodolito T16, fornecido pelo Instituto Hidrográfico;

b) realização de perfis longilitorais da localização da linha de maré baixa e da crista da berma;

c) obtenção de dados de agitação na rebentação por estimativa visual, durante a maré alta, todos os dias;

d) obtenção de dados relativos aos níveis de “runup”, durante a maré alta, para várias condições de agitação incidente.

O ponto de origem do perfil-mãe da campanha, denominada Tocha 0, correspondeu ao ponto de origem dos perfis obtidos nas campanhas MOLICEIRO para Palheiros da Tocha. As outras quatro cabeças de perfil foram colocadas para norte e para sul do ponto de origem do perfil-mãe, espaçadas cerca de 25 m umas das outras. Os restantes perfis foram, então, designados por Tocha 50S, Tocha 25S, Tocha 25N e Tocha 50N.

O local de realização da campanha foi escolhido devido às suas características de fácil acessibilidade, à possibilidade de apoio logístico próximo e às condições naturais da praia em questão, por não se fazerem sentir influências antrópicas directas, significativas, sobre a dinâmica da mesma.

A tabela 2.2. descreve o tipo e a quantidade de dados obtidos no decurso da campanha.

Tabela 2.2. Súpula do tipo e quantidade de dados obtidos na campanha Tocha 92.

Data	28/11	29/11	30/11	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12	9/12	10/12	11/12	12/12	13/12	14/12	15/12	16/12
<i>Perfis de praia</i>																			
Tocha 50S	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	X
Tocha 25S	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	X
Tocha 0	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	X
Tocha 25N	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	X
Tocha 50N	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	X
<i>Perfis longilitorais</i>																			
Crista da berma	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	X
Linha maré baixa	X	X	X			X			X						X	X	X		
<i>Registo de ondas</i>																			
Observação visual	X	XX	XX	XX	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	XX	X	X
Bóia ondógrafo	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
<i>Níveis de Runup</i>																			
Medições	X	X		X				X	X					X		X			

xx - Duas medições a diferentes horas, no mesmo dia.

o - Dados fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (bóia-ondógrafo da Figueira da Foz).

Registaram-se algumas lacunas na obtenção de perfis pelos seguintes motivos:

4/12 - as fortes rajadas de vento (cerca de 90 km/h) e de chuva, aliadas a uma elevada quantidade de areia transportada eolicamente, não permitiram a realização de perfis com teodolito;

7/12 - a existência de uma maré negra, por limpeza de tanques ao largo, não permitiu qualquer tipo de trabalho sobre a praia;

9/12 - devido a substituições entre os vários participantes, não foi possível ter o número suficiente de pessoas disponíveis para apoiar o desenvolvimento dos trabalhos

de campo neste dia;

12/12 - a ocorrência de problemas com a regulação do nível do teodolito (apenas verificados posteriormente) fez com que os perfis transversais deste dia fossem rejeitados por falta de confiança.

Os problemas verificados nos dias 4, 7 e 9 afectaram igualmente a obtenção de dados de "runup". O conjunto de dados deste tipo foi ainda menor por:

a) não ser possível obter tais registos com apenas duas pessoas no campo (situação que se verificou algumas vezes);

b) terem existido dificuldades em efectuar medições após a maré negra (7 a 10 de Dezembro), visto que obrigava a trabalhar constantemente sobre a nafta.

### 2.1.3. Campanha Areão 95

Esta campanha decorreu entre 10/4/95 e 17/4/95, na Praia do Areão, tendo como objectivos principais:

a) recolha de perfis diários, durante a maré baixa, em três locais, tendo-se utilizado um teodolito T16, cedido pelo Instituto Hidrográfico;

b) registo de dados de agitação, na rebentação, por observação visual, durante a maré alta;

c) obtenção de dados relativos a níveis de "runup", durante a maré alta, para as condições de agitação vigentes.

O perfil mãe da campanha Areão 95 foi denominado Perfil Centro, dispendo-se os outros dois perfis para norte e sul, distando cada deles cerca de 35m do perfil central. Os perfis denominam-se, assim, de Areão N, Areão C e Areão S. Todos os pontos foram referenciados ao ponto de origem do perfil mãe. Todos os pontos de origem de perfis estavam localizados no topo do cordão dunar existente.

O local da campanha foi escolhido devido às suas características de fácil acesso, à possibilidade de apoio próximo e às condições de certa forma diferentes relativamente a Palheiros da Tocha. A praia do Areão apresenta vigorosa arriba talhada no cordão dunar e, de acordo com trabalhos prévios (Ferreira, 1993), foi verificada a menor dimensão volumétrica das barras arenosas submersas na parte norte do troço costeiro Aveiro - Cabo Mondego, quando comparadas com as presentes em Palheiros da Tocha. Pretendia-se, assim, obter dados respeitantes a duas áreas naturais, sem

influência directa de estruturas costeiras, mas onde uma delas se apresenta em equilíbrio dinâmico (Palheiros da Tocha) e a outra em instabilidade acentuada, traduzida por um elevado recuo da linha de costa e pela existência de arriba (Areão).

A tabela 2.3. contém uma súmula dos dados obtidos durante a campanha Areão 95.

Tabela 2.3. Tipo e quantidade de dados adquiridos em Areão 95.

Data	10/4	11/4	12/4	13/4	14/4	15/4	16/4	17/4
<i>Perfis de praia</i>								
Areão N		X	X	X	X	X	X	X
Areão C	X	X	X	X	X	X	X	X
Areão S		X	X	X	X	X	X	X
<i>Registos de ondas</i>								
Observação visual		X	X	X	X	X	X	X
Bóia ondógrafo		o	o	o	o	o	o	o
<i>Níveis de "runup"</i>								
Medições		X	X	X	X	X		X

o - Dados fornecidos pelo Instituto Hidrográfico, obtidos na bóia ondógrafo de Sines

Os trabalhos iniciaram-se no final da tarde do dia 10/4/95, tendo sido apenas possível obter, nesse dia, o perfil Areão C. Nos restantes dias procedeu-se à recolha de todos os dados planeados, excepto no dia 16/4 onde não foi possível efectuar medições de "runup" devido à elevada obliquidade das ondas incidentes relativamente à linha de costa, tornando-se difícil a determinação de valores de "runup" individuais, por elevada interacção entre os vários níveis de espraio.

#### 2.1.4. Campanha LUAR Mira-Tocha

A campanha LUAR Mira-Tocha decorreu na praia de Canto do Marco (Palheirão, figura 1.1.), em Março de 1992, com o objectivo de avaliar o transporte longilitoral em ambiente de elevada energia. Para tal, foram colocados cerca de 100 kg de areia marcada com tinta fluorescente, tendo-se colhido 64 amostras ao longo de 14 perfis desde o local de lançamento das areias até cerca de 1000 m para sul. A existência de dois perfis de estacas graduadas colocadas na praia, conjuntamente com dois buracos de controle e com os levantamentos morfológicos, permitiu a obtenção de valores de remobilização associados às condições de agitação vigentes no decorrer da campanha. A altura da onda na rebentação foi estimada visualmente, sendo os

levantamentos dos perfis de praia obtidos por teodolito.

#### 2.1.5. Campanha LUAR Culatra 93

A campanha LUAR Culatra 93 realizou-se nos dias 7 e 8 de Outubro de 1993, na parte central da ilha barreira da Culatra (figura 1.2.), sistema de ilhas barreira da Ria Formosa (Algarve - Portugal). Foram objecto de análise três ciclos de maré, sendo o regime de ondas medido por transdutores de pressão colocados na parte inferior da face da praia e as variações morfológicas obtidas através da execução de perfis topográficos com teodolito. Utilizaram-se, ainda, 116 kg de areia marcada com tinta fluorescente, com vista à determinação do transporte longilitoral e da profundidade de mistura. Devido à pequena amplitude de maré existente (marés mortas), apenas foram colhidos cerca de 24 testemunhos verticais na primeira maré baixa após a colocação do traçador, 14 testemunhos na segunda e 11 na terceira.

#### 2.1.6. Campanha LUAR Garrão 95

A campanha LUAR Garrão 95 teve lugar em 16-17 de Maio de 1995 na Praia do Garrão (Algarve, figura 1.2.). Esta praia tem como limite interno quer cordão dunar quer arribas talhadas em arenitos pouco consolidados. Durante a campanha foram depositados 60 kg de areia marcada e observados dois ciclos de maré. O regime de agitação foi obtido pela análise dos dados de três transdutores de pressão posicionados na parte inferior da face da praia. Alguns dos perfis topográficos obtidos com teodolito apresentaram alterações relativamente ao seu comportamento normal, visto que os responsáveis pelos restaurantes locais movimentaram areia da parte inferior da face da praia para a parte superior, tentando evitar a erosão das arribas.

Na primeira maré (16 de Maio) foram colhidos 37 testemunhos verticais ao longo de 12 perfis de praia, entre o ponto de injeção da areia e 300 m para leste. Recolheram-se, em cada perfil, 3 a 4 testemunhos espaçados de 10 m na perpendicular à face da praia. Na segunda maré (17 Maio) foram obtidos 28 testemunhos ao longo de 7 perfis, estando os testemunhos igualmente espaçados de 10 m na perpendicular à face da praia.

### 2.1.7. Campanha LUAR Faro 96

A Praia de Faro, onde decorreu a campanha LUAR Faro 96, constitui parte da Península do Ancão, situada na extremidade ocidental do sistema de ilhas barreira da Ria Formosa (figura 1.2.). A campanha teve lugar a 6-7 de Março de 1996 e apenas se observou um único ciclo de maré, tendo sido depositados cerca de 120 kg de areia marcada com vista à obtenção de dados de transporte longilitoral e remobilização. Um conjunto de três transdutores foi colocado na parte inferior da face da praia para obter as propriedades das ondas na rebentação. A morfologia da praia foi determinada por recurso a levantamentos com teodolito. Devido à existência de um elevado transporte longilitoral, optou-se por um espaçamento entre perfis amostrados de 50 m a 100 m, obtendo-se um total de 77 testemunhos verticais e de 20 amostras superficiais (na zona submersa), em 27 perfis. Colheram-se, em média, 3 testemunhos por perfil, espaçados de 10 m entre si, na perpendicular à praia.

### 2.1.8. Campanha Quarteira 96

Esta campanha realizou-se na Praia de Forte Novo, cerca de 300 m a leste do molhe nascente de Quarteira (figura 1.2.). A praia contacta para o interior com arribas talhadas em arenitos pouco consolidados, apresentando recuo elevado. As condições de agitação na rebentação foram obtidas através de três transdutores de pressão colocados durante a maré baixa, bem como por estimativa visual. O método para a determinação da profundidade de mistura correspondeu a uma associação de utilização de estacas graduadas com buracos preenchidos por areia colorida. Um conjunto de 16 estacas e de 16 buracos respectivos foram colocados ao longo de 4 perfis espaçados longilitoralmente 10 m uns dos outros. O espaçamento dos perfis foi escolhido por forma a integrar um sistema completo de "beach cusps". O espaçamento das estacas na perpendicular à praia foi escolhido de acordo com a posição do máximo nível de esprai da maré anterior e com as variações de pendor berma/face da praia. A campanha realizou-se em 26-27 de Março de 1996 tendo sido observado um ciclo de maré. O posicionamento das estacas e dos buracos, bem como a determinação da morfologia da praia, foram efectuados com teodolito.

### 2.1.9. Campanha Quarteira 97

A campanha Quarteira 97 realizou-se no mesmo local e com a mesma metodologia da campanha Quarteira 96. As diferenças principais consistiram na análise de 3 ciclos de maré, a 15, 18 e 20 de Março de 1997, tendo sido colocadas 36 estacas e 36 buracos para cada maré, em 6 perfis perpendiculares à praia, que integravam, igualmente, um conjunto de "beach cusps" bem definido.

### 2.1.10. Campanha LUAR Faro 97

Esta campanha decorreu na Praia de Faro, no dia 24 de Abril de 1997, tendo sido utilizados quer traçadores quer estacas e buracos de controle. Cerca de 100 kg de areias tingidas com tinta fluorescente foram largadas na praia, tendo sido também colocadas 42 estacas e 42 buracos com areia castanha. As estacas e os buracos encontravam-se separados por 6 perfis espaçados longilitoralmente cerca de 10 m, englobando um conjunto completo de "beach cusps". O espaçamento entre estacas, na perpendicular à praia, foi de 5 m, tendo estas sido posicionadas por recurso a teodolito. As condições de agitação foram obtidas através do uso de dois transdutores de pressão colocados na parte inferior da face da praia.

### 2.1.11. Campanhas VASA

As campanhas VASA (VARIações SAzonais da Morfologia da Praia de Faro) consistiram na realização mensal de levantamentos de 5 perfis topográficos estabelecidos ao longo da Praia de Faro, em condições de maré viva baixa, quer em áreas com elevada ocupação, quer em locais de ocupação pouco intensa. Os locais escolhidos estão evidenciados na figura 2.1., sendo designados de A a E de Oeste para Este. As campanhas VASA iniciaram-se em Maio de 1995 e prolongam-se até à actualidade, ainda que o período entre amostragens tenha aumentado após Maio de 1997. Os dados analisados nesta dissertação referem-se, apenas, aos dois anos de observação que mediaram entre Maio de 1995 e Maio de 1997. Nestes dois anos obtiveram-se 24 perfis no local A, 22 perfis no local B, 24 perfis no local C, 22 perfis

no local D e 19 perfis no local E. A variabilidade no número de perfis realizados ficou a dever-se à impossibilidade pontual de efectuar levantamentos em alguns dos locais, nomeadamente no mais afastado (local E) da estrada de acesso, e à não utilização de um ou outro perfil por menor fiabilidade dos dados. Este último caso, que aconteceu raramente, prendeu-se com mau nivelamento pontual do teodolito.

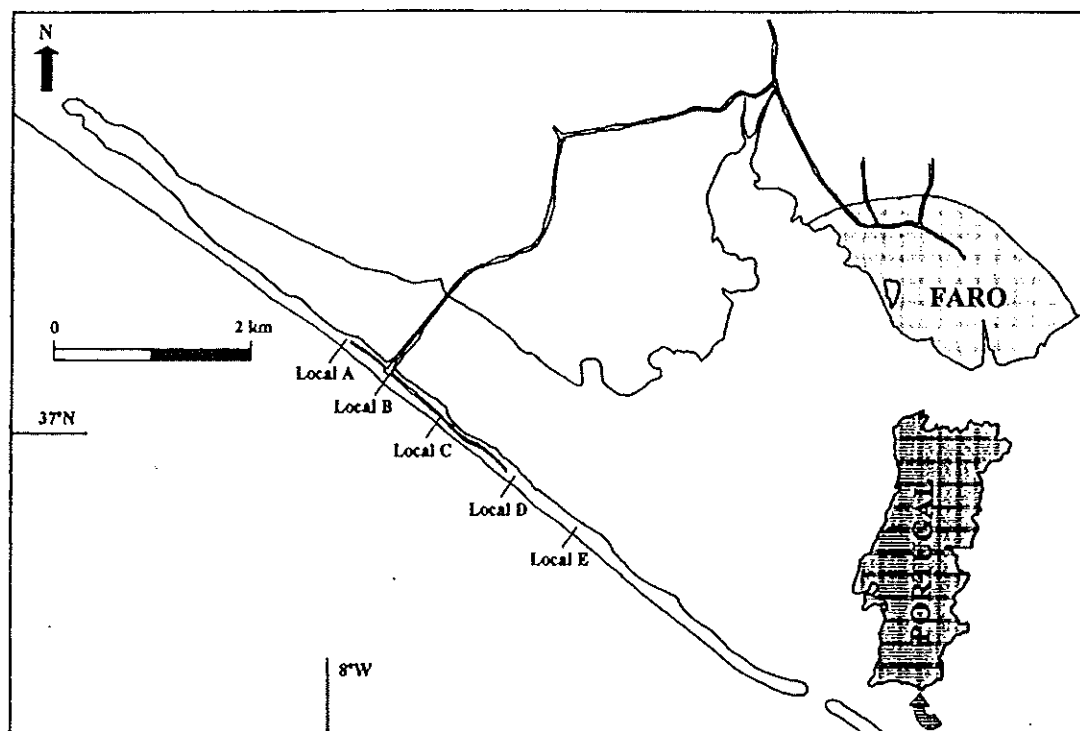


Figura 2.1. Localização dos perfis ocupados nas campanhas VASA.

## 2.2. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS MORFOLÓGICOS

Os dados brutos obtidos através da utilização de teodolitos, relativos à morfologia da praia, foram colocados e tratados em folha de cálculo EXCEL, da Microsoft, efectuando-se a reprodução gráfica dos vários perfis recolhidos. A sua comparação qualitativa foi também estabelecida através da análise de gráficos EXCEL, enquanto que as determinações volumétricas se efectuaram através do programa SURFER da Golden Software. Este programa permite a utilização de vários métodos para efectuar as malhas ("grids") que depois serão utilizadas no cálculo volumétrico. Após análise comparativa entre métodos e dos resultados obtidos em cada deles, optou-se por utilizar o método "kriging", sem exclusão dos elementos fora dos limites definidos e utilizando a totalidade dos pontos amostrados entre limites.

O programa SURFER permite um cálculo de volumes por três métodos (regra

trapezoidal, regra de Simpson e regra de Simpson 3/8), tendo-se verificado que a diferença entre métodos não foi significativamente diferente e próxima do erro esperado pela execução dos próprios perfis (entre 1 m<sup>3</sup>/m e 2 m<sup>3</sup>/m). Foi, então, utilizado o método que o programa fornece por omissão.

### 2.3. AQUISIÇÃO, TRATAMENTO E VALIDAÇÃO DOS DADOS DE AGITAÇÃO (OBTIDOS POR ESTIMATIVA VISUAL)

A obtenção de dados de agitação na rebentação deve ser feita, idealmente, através da colocação de instrumentos de medição na zona de rebentação, tais como transdutores de pressão. No entanto, o relativamente elevado custo destes equipamentos, as dificuldades da sua colocação em meios de energia elevada e o grande risco da sua perda ou danificação pelas condições turbulentas associadas ao processo de rebentação leva a que sejam relativamente escassas as experiências com obtenção de dados reais de agitação na rebentação. Particularmente, em condições de elevada energia e para zonas com múltiplas linhas de rebentação, como é o caso da área de estudo preferencial deste trabalho (Aveiro - Cabo Mondego). Para obstar a estas limitações, recorreu-se à estimativa visual como forma de obter dados de agitação. Nas campanhas efectuadas em praias do Algarve, de energia mais moderada, utilizaram-se transdutores de pressão, tendo-se procedido à análise dos registos obtidos.

O recurso à observação visual tem como vantagens o baixo custo na obtenção de dados e a aquisição de valores exactamente na zona de rebentação, o que não é conseguido pela maioria dos equipamentos, dada a sua posição fixa e a variação na posição da rebentação com o evoluir da maré. Por outro lado, o tratamento dos dados visuais é simples e pouco moroso, contrariamente à análise espectral, necessária para o tratamento estatístico de séries obtidas a partir de aparelhos de precisão (Balsillie e Carter, 1984a,b; Plant e Griggs, 1992). Contudo, uma série de questões podem ser colocadas relativamente à representatividade e precisão dos dados obtidos visualmente, pelo que se procederá a uma análise dos mesmos e a uma avaliação das possibilidades de utilização deste tipo de dados.

As fontes potenciais de erro que contribuem para um menor rigor das observações visuais das condições de agitação são as condições de mar (calmaria a

temporal), presença ou ausência de formas de fundo, a posição do observador relativamente à rebentação e a própria visibilidade (Balsillie e Carter, 1984b). Outros factores que podem igualmente afectar a estimativa são a existência de ondas reflectidas, a ocorrência de grupos de ondas sobrepostas, a existência de correntes longilitorais fortes e a interacção onda-onda na rebentação. Tem sido observado por vários autores que a variação dos valores estimados de observador para observador constitui um factor adicional de incerteza (Balsillie e Carter, 1984a,b; Smith e Wagner, 1991; Plant e Griggs, 1992; Melo, 1993), sendo que os observadores mais treinados e experientes possibilitam, normalmente, a obtenção de resultados mais fiáveis.

Pode ainda ser questionável se para diferentes distâncias da rebentação à linha de costa não haverá tendência para estimar diferentes valores de altura, com ondas de igual dimensão. Sendo correcto que a imagem na retina, de um qualquer objecto, aumenta para o dobro com o encurtamento da distância de observação para metade existe, no entanto, um processo cerebral automático denominado "size constancy" (manutenção ou constância do tamanho), segundo o qual o sistema sensorial humano compensa as variações da imagem da retina devidas a variações na distância observada (Gregory, 1978 *in* Balsillie e Carter, 1984a). Isto é, há uma tendência para aumentar a imagem duas vezes para cada duplicação da distância relativamente ao ponto de observação (Lei de Emmert). Desta forma, o cérebro é responsável pela atribuição de uma escala à imagem óptica da retina, permitindo uma representação real do tamanho de objectos a várias distâncias (Gregory, 1978 *in* Balsillie e Carter, 1984a). Este fenómeno de compensação funciona melhor para objectos em aproximação do observador do que para objectos que se afastam, o que se torna uma vantagem adicional para a estimativa de ondas a partir da praia. No entanto, há limites de aplicação, visto que à medida que as distâncias aumentam a compensação tende a não funcionar tão bem.

### 2.3.1. Aquisição de dados

Recorreu-se à estimativa visual sistemática da ondulação em duas das campanhas de campo (Tocha 92 e Areão 95), tendo sido utilizados métodos diferentes, de acordo com a especificidade de cada campanha e por forma a proceder a testes relativamente ao rigor dos dados.

### 2.3.1.1. Campanha Tocha 92

Na campanha Tocha 92 registou-se, geralmente, a ocorrência de três linhas de rebentação, ainda que a linha mais afastada não estivesse sempre bem evidenciada. As linhas de rebentação foram denominadas de primeira, segunda e terceira de acordo com a sua posição, do mar para terra, devendo coincidir respectivamente com a barra externa, a barra interna e a face da praia. Estas rebentações são representadas neste trabalho pelos indicativos  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ . A observação da altura da onda ( $H$ ) em cada linha de rebentação foi feita de forma diferente.

*Estimativa de  $H_{b1}$*  - Devido à grande distância da linha de rebentação ( $> 250$  m) ao local de observação (face da praia/berma) e à existência de trens de ondas (em alguns dos dias) que quase não rebentavam neste local, tornou-se difícil medir com rigor todas as ondas de um trem incidente, pelo que se optou pela estimativa de uma altura única. Esta foi determinada aplicando o método cognitivo (Balsillie e Carter, 1984a), com os seguintes procedimentos:

- i) escolha do intervalo unitário em que a onda média se enquadraria (ex.: 3 a 4 m);
- ii) divisão desse intervalo em duas classes separadas de 0.5 m e escolha do intervalo mais aproximado ao tamanho estimado da onda (ex.: 3.5 a 4.0 m);
- iii) aproximação do valor obtido a valores separados de 1/4 de metro (ex.: escolha de 3.75 m). Para ondas inferiores a 2.0 m o valor obtido foi tentativamente aproximado à décima.

A escolha do valor apontado no ponto iii) revestiu-se de alguma dificuldade e incerteza, pelo que se pode considerar esta última aproximação como estando dentro dos limites de erro da observação visual.

*Estimativa de  $H_{b2}$*  - A altura média da onda foi obtida pela média de todas as alturas estimadas de cerca de 40 ondas consecutivas, sendo que para ondas superiores a 2.0 m o rigor de observação foi de 1/4 de metro e para valores de  $H_{b2} < 2.0$  m foi decimal.

*Estimativa de  $H_{b3}$*  - Junto à face da praia foram igualmente contabilizadas todas as alturas de cerca de 40 ondas consecutivas, sendo as estimativas visuais ajudadas pelo posicionamento de uma estaca de ferro com 3 m de altura, graduada de 20 cm em

20 cm, cravada na zona de rebentação, o que permitiu uma precisão geral de 10 cm nas anotações.

Os períodos foram obtidos para a 2ª e 3ª linhas de rebentação através da contabilização do tempo necessário para ocorrer a rebentação de 40 ondas incidentes consecutivas e dividindo esse valor (em segundos) pelo número de ondas. No entanto, é possível que algumas ondas pequenas não tenham sido contabilizadas, nomeadamente se não rebentavam na 2ª linha de rebentação.

Todas as observações foram efectuadas em maré alta, por um único observador, autor desta dissertação.

#### 2.3.1.2. Campanha Areão 95

Durante a campanha realizada em Praia do Areão (figura 1.1.) apenas se observou uma linha de rebentação, em maré alta, junto à face da praia. Foram registadas as alturas de todas as ondas que rebentavam sobre a face da praia durante um período de 10 minutos. Antes de se iniciar cada conjunto de estimativas da altura das ondas, utilizou-se uma régua graduada (régua de teodolito, com altura máxima de 4 m e graduação centimétrica) para se obter uma noção de escala das ondas. Não se procedeu à colocação de uma estaca cravada na praia por essa solução ter originado alguns problemas na campanha Tocha 92, visto que aprisionou e danificou uma rede de pescadores. O período de onda foi obtido dividindo os 600 segundos de observação pelo número de ondas registadas.

A diferença mais significativa no que respeita à experiência Tocha 92 foi a utilização de um total de quatro observadores diários, sendo dois deles permanentes durante toda a campanha e os outros dois não-permanentes. Ao longo da experiência utilizaram-se seis observadores, dos quais apenas um tinha experiência prévia na estimativa de alturas de ondas. Dois dos restantes observadores possuíam como experiência o facto de praticarem "surf" com alguma regularidade. Os surfistas são considerados, por alguns autores (Melo, 1993; Battalio, 1994), observadores competentes e entusiásticos, pelo que têm sido frequentemente escolhidos para programas de observação visual da ondulação.

## 2.3.2. Estimativa de erros na observação visual da altura das ondas

### 2.3.2.1. Estudos prévios

Schneider (1977) comparou dados obtidos visualmente, pertencentes ao programa LEO (“Littoral Environmental Observation Program”), com dados obtidos por instrumentos, utilizando um conjunto de quatro locais, 12 observadores e 199 observações. De forma geral, as estimativas visuais obtidas estiveram próximas das medições instrumentais, havendo uma tendência geral para que as alturas do programa LEO fossem maiores do que as instrumentais, o que terá sido causado pelo efeito de empolamento da onda entre o local de medição e a rebentação, devendo essa diferença ser real. A autora considera que a obtenção de uma única observação diária pode não ser suficiente para descrever adequadamente as condições de agitação nesse dia, devido à ocorrência de grande variabilidade na agitação medida, ao longo do dia, para o local analisado.

Schneider e Wegel (1980 *in* Smith e Wagner, 1991) referem que os dados do programa LEO representam uma fonte útil e barata de informação e possibilitam boas estimativas das alturas das ondas prevalentes na rebentação. Alertam, no entanto, para a utilização cuidada dos dados, com reconhecimento das suas limitações.

Balsillie e Carter (1984a,b) utilizaram um total de 82 observações, adquiridas por 16 observadores, separados em duas categorias (experientes e inexperientes), para quantificarem o rigor e os erros associados à estimativa visual das condições de agitação. Para cada estimativa foram observadas 30 ondas consecutivas na rebentação, sem ajuda de qualquer escala. Imediatamente após essa estimativa, eram medidas 30 ondas incidentes recorrendo-se a uma régua graduada fixa ao fundo. As alturas medidas variaram entre poucos centímetros e cerca de 1 m. Os autores concluíram que:

i) a estimativa visual é um método simples, barato e fidedigno para obter dados de ondas;

ii) os observadores experientes conseguem medir correctamente alturas médias da ondulação e que essas alturas não correspondem necessariamente a alturas significativas, como previamente expresso em trabalhos de outros autores;

iii) a distribuição de Rayleigh pode ser uma boa aproximação para o comportamento espectral de ondas em águas profundas mas não é adequada para a rebentação, sendo a distribuição Gaussiana mais representativa, pelo que os momentos estatísticos normalmente utilizados para águas profundas não devem ser utilizados para condições na rebentação;

iv) o erro médio associado à estimativa visual é de cerca de 20%, sendo por isso semelhante ao erro associado às teorias de onda clássicas, pelo que a utilização de uma teoria de onda para propagar uma condição de agitação ao largo até à rebentação terá, em média, o mesmo erro que uma observação visual para a mesma agitação;

v) o erro máximo observado foi de 62%, mas o erro para o valor médio de uma série temporal será sempre inferior a valores individuais.

Balsillie e Carter (1984a,b) não conseguiram determinar qualquer tendência global de sobrestima ou de subestima para o grupo de observadores experientes, enquanto que o grupo de observadores inexperientes apresentou uma sobrestima média de 21%.

Smith e Wagner (1991) utilizaram 58 dados para a comparação entre medições de alturas médias do programa LEO e alturas significativas obtidas por instrumentação colocada fora da rebentação, tendo obtido uma diferença média de 27% para a globalidade dos valores medidos, com a maior parte dos valores a possuírem uma diferença menor que 20%. Os autores referem que a correlação entre dados poderia ser melhor caso possuíssem registo instrumental na rebentação e se tivessem comparado alturas médias para ambos os casos. Numa análise final, referem que a altura da onda estimada visualmente está dentro de um erro de 30% relativamente à altura medida.

Plant e Griggs (1992) procederam igualmente à comparação de dados do programa LEO com dados medidos por instrumentação colocada num local fora da rebentação, com 13m de profundidade. As alturas medidas nesse local foram transformadas para valores previstos na rebentação, utilizando uma formulação empírica de Komar (1976), baseada na teoria linear. Nesta formulação entra o coeficiente de refração, que foi assumido pelos autores como sendo constante, com um valor de 0.7, ainda que na realidade seja variável, atingindo valores entre 0.5 e 1.0. É de notar que, com este tipo de aproximação, se estão a cometer erros de aproximação que podem atingir um valor máximo de 30%, quando a aproximação das ondas é perfeitamente paralela à linha de costa. Os autores concluem que o rigor das

estimativas visuais é dependente da altura e do período das ondas incidentes, ainda que haja uma relação estatística significativa entre o rigor de observação e os parâmetros das ondas. De uma forma geral, os observadores subestimaram o valor das ondas mais altas, o que se pode dever à ocorrência de dissipação de energia entre o local de medição instrumental e a rebentação.

### 2.3.2.2. Análise comparativa dos dados obtidos

Com vista à obtenção de uma ideia dos erros associados à observação visual e da variabilidade existente entre diferentes observadores, foram efectuados alguns testes simples aos dados recolhidos.

#### *Comparação entre a estimativa visual e alguns métodos de previsão*

Por forma a avaliar a qualidade relativa dos dados obtidos, nomeadamente dos respeitantes à primeira linha de rebentação (rebentação externa) da campanha Tocha 92, recorreu-se à utilização de formulações existentes para transformação de alturas de ondas ao largo para alturas de ondas na rebentação. As formulações foram aplicadas aos dados fornecidos pelo Instituto Hidrográfico, relativos a medições efectuadas ao largo, por uma bóia-ondógrafo. As comparações efectuadas terão de ser analisadas de um ponto de vista relativo, pois que as teorias de previsão possuem erros de estimativa da ordem dos 20% (Balsillie e Carter, 1984a).

Para esta análise comparativa recorreu-se à simplificação de duas teorias, teoria linear e teoria solitária, através de formulações determinadas por Komar e Gaughan (1972), para a teoria linear, e por Munk (1949), para a teoria solitária. Estas formulações foram escolhidas por serem frequentemente citadas e utilizadas na literatura (ex.: Komar, 1976; Carter e Balsillie, 1983; Carter, 1988; Sunamura, 1989; Fredsøe e Deigaard, 1992). As fórmulas utilizadas foram:

$$\text{Komar e Gaughan} \quad H_b = 0.39g^{0.2}(TH_o^2)^{0.4} \quad (2.1)$$

$$\text{Munk} \quad H_b/H_o = 0.3(L_o/H_o)^{1/3} \quad (2.2)$$

sendo  $H_b$  a altura da onda na rebentação,  $H_o$  a altura da onda ao largo,  $T$  o período da onda,  $g$  a aceleração gravítica e  $L_o$  o comprimento de onda ao largo. Numa comparação entre as duas equações de previsão, Komar e Gaughan (1972) referem que a equação 2.2 está limitada a produzir melhores resultados para valores de  $H_o/L_o$  pequenos, enquanto que a equação 2.1 é de aplicação generalizada a qualquer declividade de onda.

Na figura 2.2. comparam-se os valores de alturas estimadas visualmente e previstas pelas formulações, para a primeira rebentação da campanha Tocha 92. Da sua análise pode concluir-se que as formulações de Munk e de Komar e Gaughan possuem previsões relativamente próximas entre si e aos dados estimados. De uma forma geral, parece existir uma sobrestima visual das maiores alturas da ondulação relativamente a qualquer das previsões, existindo um razoável acordo entre valores previstos e estimados para valores de  $H_{b1}$  entre 1 m e 5 m.

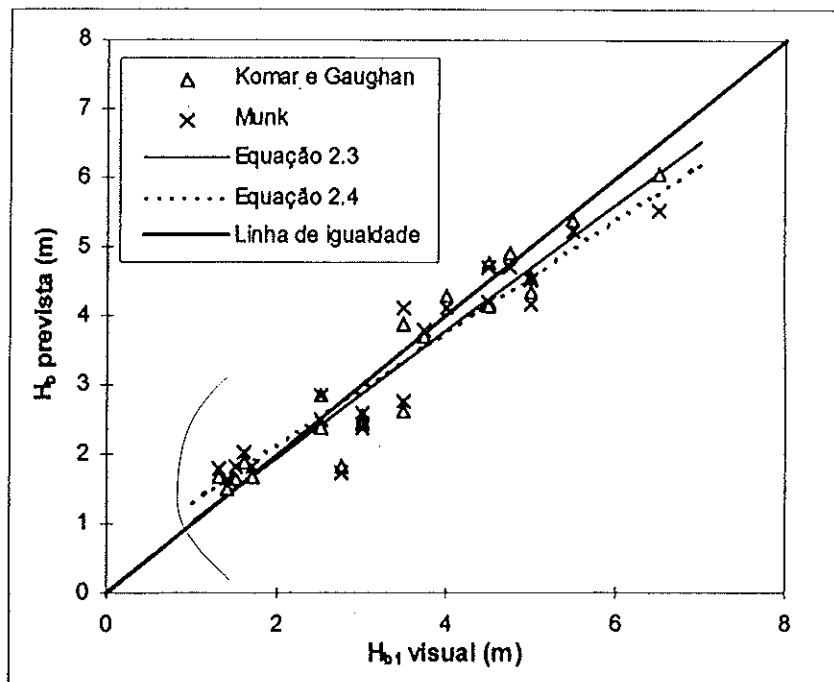


Figura 2.2. Relação entre valores de altura da onda na rebentação, estimados visualmente e previstos por formulações.

O desvio médio entre as observações visuais e as previsões pode ser dado pelas seguintes expressões:

$$H_{b1} = 1.048H_b \text{ (Komar e Gaughan)} \quad (2.3)$$

$$H_{b1} = 1.039H_b \text{ (Teoria solitária)} \quad (2.4)$$

Comparando as previsões obtidas através das duas formulações utilizadas é possível verificar que os seus valores podem discordar entre si em cerca de 0.5 m para valores de  $H_b$  de 6 m, ou seja, cerca de 10%, valor aproximadamente igual às diferenças geralmente registadas entre os métodos e a estimativa visual.

Face aos resultados obtidos, pode referir-se que o recurso a uma simplificação de uma teoria de onda (solitária ou linear) para estimar os valores de  $H_b$ , tendo por base registos ao largo, produz resultados com um erro semelhante ao que a estimativa visual permite. A boa concordância entre os valores estimados visualmente e os previstos pelas formulações de Munk e de Komar e Gaughan valida a utilização dos valores obtidos no campo.

#### *Comparação entre observadores/Precisão dos dados*

Os dados obtidos pelo conjunto de seis observadores que participaram na campanha Areão 95 foram analisados tendo em vista conhecer a variação na altura da onda produzida pela diferença associada à estimativa de cada indivíduo.

Na tabela 2.4. representam-se as médias de alturas estimadas visualmente na rebentação e os valores obtidos por todos os participantes, bem como a média final e o desvio percentual de cada observador. O máximo desvio médio relativamente à média das alturas observadas foi do observador JM, com uma subestima de 10%.

Na tabela 2.5. representam-se os desvios máximos para cada observação, relativamente à média e entre observadores extremos. Regista-se um desvio máximo entre observadores geralmente entre 15% e 20%, com um máximo absoluto de 36.5% e um mínimo de 13.2%. Assim, o desvio máximo esperado para observadores não treinados deverá ser da ordem dos 20%, sendo ainda possível diminuir esse valor caso exista um treino prévio ou a ajuda, no campo, através de uma vara graduada fixa.

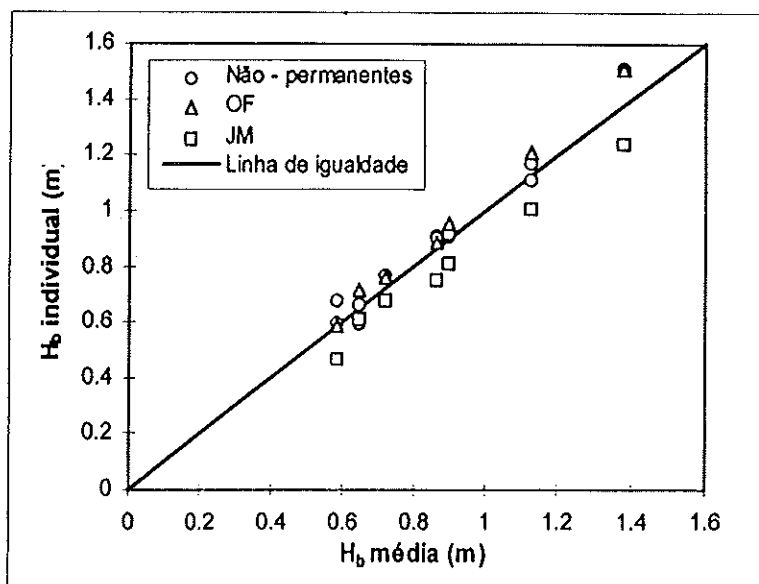
Na figura 2.3. estão representados os valores medidos pelos dois observadores permanentes e a média dos não permanentes, para cada observação, confrontados com a altura média calculada. Verifica-se que o maior desvio é obtido pelo observador JM, com subestima de todos os valores. A eliminação dos registos deste observador e a utilização apenas dos restantes, diminuiria a generalidade dos desvios médios para apenas 10%.

**Tabela 2.4.** Conjunto de alturas de ondas estimadas visualmente em Areão 95. OF, JM, SM, CL, IS e PM são os observadores.

Dias	H <sub>b</sub> (m)	OF (m)	JM (m)	Dias	H <sub>b</sub> (m)	SM (m)	CL (m)	IS (m)	PM (m)
11/4	1.12	1.21	1.00	11/4	1.12	1.11	1.17		
12/4	1.37	1.51	1.24	12/4	1.37	1.51	1.24		
13/4	0.90	0.95	0.81	13/4	0.90	0.91	0.92		
14/4	0.72	0.76	0.68	Médias	1.13	1.18	1.11		
15/4	0.58	0.59	0.47	Desvio (%)		+4.4	-1.8		
16/4	0.86	0.88	0.75	14/4	0.72			0.77	0.67
17/4	0.64	0.71	0.61	15/4	0.58			0.68	0.59
Médias	0.88	0.94	0.79	16/4	0.86			0.91	0.90
Desvio (%)		+6.6	-10.2	17/4	0.64			0.66	0.59
				Médias	0.70			0.76	0.69
				Desvio(%)				+8.6	-1.4

**Tabela 2.5.** Desvios máximos registrados entre observadores e relativamente à média.

Dia	H <sub>b</sub> (m)	Máximo desvio positivo (%)	Máximo desvio negativo (%)	Máxima variação entre observadores (%)
11/4	1.12	7.4	-10.8	18.2
12/4	1.37	9.9	-9.9	19.8
13/4	0.90	6.2	-9.7	15.9
14/4	0.72	6.6	-6.6	13.2
15/4	0.58	16.8	-19.7	36.5
16/4	0.86	5.2	-12.5	17.7
17/4	0.64	10.8	-5.5	16.3
Médias	0.88	9.0	-10.7	19.7



**Figura 2.3.** Comparação entre os valores estimados pelos observadores permanentes e não-permanentes.

### 2.3.3. Observações finais

De acordo com a análise dos dados obtidos por estimativa visual, foi possível

concluir que:

i) a utilização de estimativas visuais possui um grau de incerteza semelhante ao da propagação das ondas para condições na rebentação, através de uma das formulações utilizadas;

ii) as correspondências entre os dados estimados e os obtidos utilizando formulações para previsão possuíram um desvio médio inferior a 5%;

iii) os desvios pontuais entre as observações visuais e as previsões pelas formulações foram geralmente inferiores a 20%;

iv) os desvios de estimativa visual entre diferentes observadores estiveram normalmente compreendidos entre 15% e 20%;

Refere-se, ainda, que para a comparação entre dados obtidos por estimativa visual e por transdutores de pressão, em campanhas de campo realizadas no Algarve com alturas de onda significativa entre 0.5 m e 1.0 m, as diferenças obtidas raramente excederam os 10%, entre métodos.

#### 2.4. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE NÍVEIS DE "RUNUP"

No estudo de níveis de "runup", encontrou-se um problema inicial relacionado com a própria definição de "runup", que é variável de autor para autor (ex.: Guza e Thornton, 1982; Holman e Sallenger, 1985; Carter, 1988; Gourlay, 1992), o que pode fazer com que vários autores utilizem a mesma expressão com significados ligeiramente diferentes. Para o presente estudo utilizou-se a definição relativamente simples de Guza e Thornton (1982), segundo a qual o "runup" é composto por uma elevação relativamente ao nível médio da água ("setup") e por flutuações em torno dessa elevação ("swash" ou espraio). Assim, os níveis de "runup" corresponderão à variação, no tempo, da localização do nível instantâneo da linha de costa relativamente ao nível "estático" da água (nível da maré).

De entre os vários factores que podem afectar a qualidade dos dados obtidos, realça-se a influência das ondas reflectidas, as interacções onda-onda, a presença de "edge-waves" e possíveis variações na permeabilidade e na porosidade da praia ou, ainda, no lençol freático (Leenknecht *et al.*, 1992). A existência destes factores, de forma individual ou conjunta, pode proporcionar a ocorrência de uma elevada dispersão dos dados.

Num estudo deste tipo, a maior dificuldade reside, contudo, na comparação de níveis de “runup” para praias com condições diferentes, visto que o comportamento do “setup” e do espraio é dependente de factores como o pendur da praia, a rugosidade do fundo, a excursão da maré, a energia e o declive das ondas (Carter, 1988; Nielsen e Hanslow, 1991). Talvez este facto constitua a razão pela qual Walton (1993) considerou não existir uma metodologia genérica para a previsão do “runup” em praias naturais. Nielsen e Hanslow (1991) mencionaram, ainda, que nenhuma das teorias para cálculo de “runup” era satisfatória, por não se conhecerem bem os parâmetros de entrada essenciais, nomeadamente, a velocidade da parte superior da onda imediatamente antes de rebentar e a influência do “backwash” (ressaca) do espraio anterior.

Por forma a diminuir a influência de factores como a morfologia da praia e a excursão de maré, optou-se por obter medições em praias comparáveis e apenas durante a maré alta, excluindo-se situações de comportamento dissipativo. Por outro lado, a opção do estudo de maré alta relaciona-se ainda com a preocupação na determinação dos níveis máximos atingidos, como forma de prever os extremos superiores de actuação do mar, que condicionam a possibilidade de existência de galgamentos.

São vários os métodos existentes para a determinação dos níveis de “runup”, com maior ou menor nível tecnológico associado. As técnicas mais utilizadas baseiam-se na utilização de transdutores de pressão, de sensores com resistências ou de vídeos com apoio de referências fixas na praia. O método usado neste estudo foi mais simples, consistindo na medição do nível de início do espraio (nível de base = maré + “setup”) e do nível final atingido pelo “runup”, para cada onda, relativamente a um conjunto de referências fixas (estacas) na praia, colocadas com espaçamento igual entre si (figura 2.4.). Esta técnica baseou-se nas descrições dos trabalhos de Takezawa *et al.* (1988) e de Nielsen e Hanslow (1991). A posição e a elevação dessas estacas, no perfil, foram determinadas com rigor, recorrendo-se a um teodolito. O número de estacas utilizado variou entre 10 e 12, dependendo da extensão do “runup” em cada dia. O espaçamento utilizado entre estacas foi sempre de 2 m na horizontal, ao que correspondeu uma variação vertical entre estacas geralmente entre 15 cm e 25 cm, dependendo do pendur da face da praia.

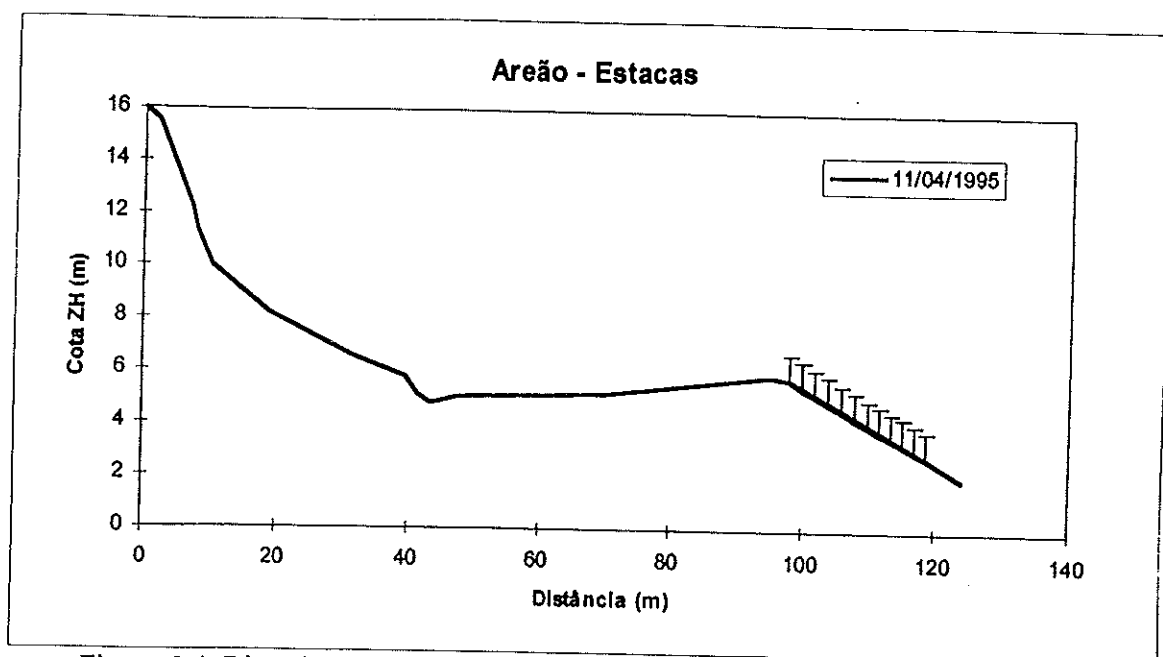


Figura 2.4. Disposição das estacas para observações de "runup" em Areão 95, no dia 11 de Abril.

As séries, obtidas durante a maré alta, tiveram uma duração de vinte minutos, durante os quais se registaram os níveis de base e os níveis finais para todas as ondas, referenciando a primeira e a última estaca ultrapassada e subdividindo o espaçamento entre essa estaca e a próxima em quartos. Por exemplo, entre a estaca 6 e 7 era possível registar os níveis 6,  $6\frac{1}{4}$ ,  $6\frac{2}{4}$ ,  $6\frac{3}{4}$  e 7, permitindo uma resolução vertical média próxima dos 5 cm. Por vezes, o espraio iniciava-se antes da primeira estaca colocada, sendo nesses casos apontado o valor do afastamento entre o nível de base e a primeira estaca, em metros. Na folha de cálculo estes valores eram colocados como negativos, por forma a não se confundirem com o valor das estacas. Nestes casos, o erro do método aumentava para cerca de 10 cm, por raramente se conseguir estimar a variação a menos de 1 m de rigor horizontal.

Para a obtenção dos registos foi necessária a presença de três pessoas a trabalhar em simultâneo. Uma acompanhava a deslocação do "runup" na face da praia, indicando via rádio a posição inicial e final. Uma segunda pessoa, colocada na berma, apontava na folha de registo as indicações comunicadas pelo observador, enquanto que o terceiro participante controlava a correspondência entre valores transmitidos e registados, ao mesmo tempo que assinalava a existência de situações de sobreposição de ondas ("overtopping") ou de ondas reflectidas.

Cada medição individual de "runup" foi obtida pela subtracção entre o nível final de espraio atingido e o nível de maré durante a medição, estando ambos referidos

ao Zero Hidrográfico. Para cada vinte minutos de observação foi possível obter um conjunto de valores para os quais se estimou o valor médio, o valor máximo e o valor de “runup” significativo (média do terço superior dos valores obtidos). Na figura 2.5. é possível ver um registo típico de “runup”.

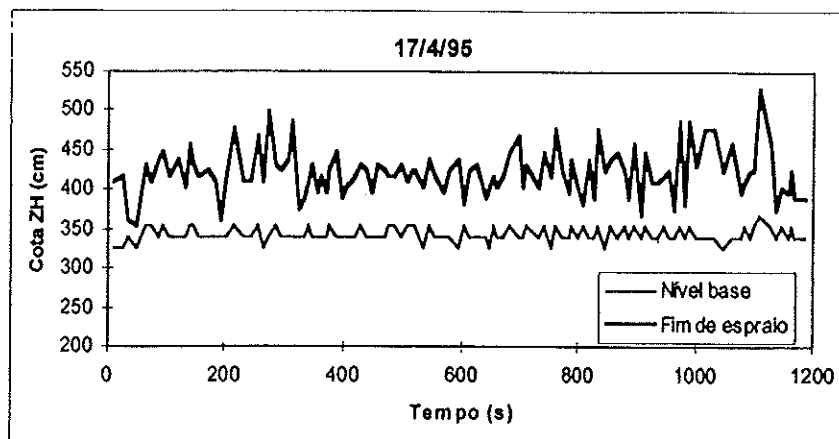


Figura 2.5. Registo típico de “runup”, obtido na campanha Areão 95.

Em alguns dos registos efectuados ocorreu, com alguma frequência, sobreposição de ondas (“overtopping”) e influência de ondas reflectidas, tendo o primeiro caso contribuído significativamente para a ocorrência de níveis mais elevados de “runup” (figura 2.6.) e o segundo para a atenuação desses níveis. Pelo facto dessas interacções serem reais e afectarem de forma decisiva os valores obtidos, não se efectuou qualquer tentativa de eliminação das mesmas.

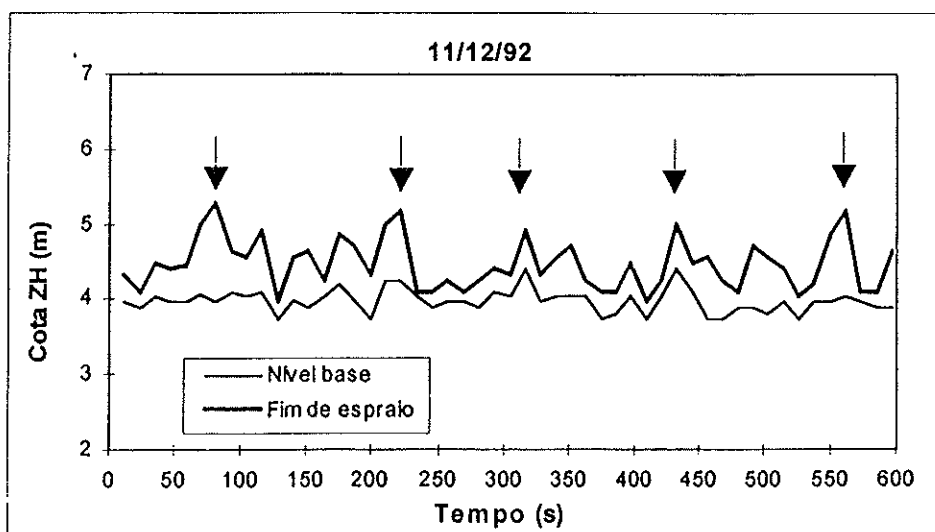


Figura 2.6. Registo de “runup” da campanha Tocha 92, evidenciando periodicidade nos níveis máximos atingidos, devido a sobreposição de ondas.

No total, obtiveram-se 13 séries de “runup”, repartidas pelas campanhas Tocha 92 (7 séries) e Areão 95 (6 séries), em regime de ondulação com energia moderada a elevada.

## 2.5. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DE REMOBILIZAÇÃO

Os dados de remobilização foram adquiridos por dois métodos distintos: análise da distribuição vertical de traçadores e análise de registos de estacas graduadas apoiadas por buracos de controle.

Para a análise da distribuição vertical de traçadores em perfis de praia, efectuou-se a colheita de testemunhos verticais, que foram seccionados em fatias de 5 cm, ainda no campo. No laboratório, foram contabilizados os grãos fluorescentes, sob incidência de uma luz ultravioleta. Os grãos contados em cada sub-amostra foram ponderados pelo peso da sub-amostra por forma a se obter uma concentração comparável. Para determinar o valor de remobilização em cada testemunho vertical, foi considerado um "cut-off rate" (limiar de corte) de 80% da concentração total do testemunho, tal como proposto por Kraus *et al.* (1982) e utilizado pela generalidade dos autores.

O segundo método, consistiu na colocação de estacas graduadas e de buracos de controlo adjacentes, ao longo de perfis de praia, durante a maré baixa, medindo-se a altura entre o topo das estacas e a superfície da praia. Os buracos de controlo, com profundidades entre 30 cm e 40 cm, foram colmatados com areia colorida. Na maré baixa seguinte, voltou-se a medir a altura entre o topo da estaca e a superfície da praia, registando-se a variação ocorrida. Determinou-se, ainda, a que profundidade aparecia a areia colorida, relativamente à superfície.

Em casos em que a superfície apresentava um nível igual (condições de equilíbrio) ou em casos de acreção, a profundidade à qual a areia colorida aparecia relativamente à superfície era considerada a profundidade de mistura. Nos casos em que a erosão predominou, essa profundidade foi somada à deslocação da superfície para obter o nível total de actuação. Esta aproximação é apenas válida se não existirem eventos extremos de acreção ou de erosão. Caso contrário, a aquisição de um conjunto de dados facilmente analisáveis torna-se difícil.

As profundidades de mistura obtidas foram integradas por perfil e por campanha, calculando-se valores médios e máximos.

## 2.6. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS SEDIMENTOLÓGICOS

Em algumas das campanhas efectuadas (VASA e MOLICEIRO 1/92) foram recolhidas amostras superficiais de sedimento de forma sistemática, ao longo dos perfis de praia efectuados. Os dados das amostras das campanhas VASA não foram utilizados no âmbito desta dissertação. Pelo contrário, as 41 amostras superficiais de sedimento, da duna, alta praia, berma e face da praia, obtidas ao longo dos 10 perfis de praia da campanha MOLICEIRO 1/92, foram usadas para a caracterização sedimentológica do sector Aveiro - Cabo Mondego. Foram, ainda, colhidas amostras de sedimentos da face da praia nas campanhas LUAR, bem como nas campanhas Quarteira. Todas as amostras foram lavadas, secadas e peneiradas por crivos, a intervalos de  $0.5 \phi$  em  $0.5 \phi$ , desde  $-1 \phi$  (2 mm) até  $4 \phi$  (63  $\mu$ ). Com os resultados obtidos calcularam-se os valores de média granulométrica, calibragem e assimetria de acordo com o método dos momentos. A percentagem de finos foi praticamente nula em todas as amostras, razão pela qual não se procedeu à sua granulometria detalhada. Foi necessário, em algumas amostras, utilizar peneiros adicionais, até aos  $-2 \phi$ , devido à existência de fracção grosseira.

### 3. ENQUADRAMENTO

#### 3.1. CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS

##### 3.1.1 Marés

Em Portugal Continental as marés têm carácter semi-diurno, com ciclos de maré de aproximadamente 12h25m e propagação de Sul para Norte.

De acordo com os dados da Tabela de Marés de 1997 (Instituto Hidrográfico, 1996), a amplitude média de maré em águas vivas (AV) prevista para o porto de Aveiro é de 2.66 m, enquanto que a amplitude média em águas mortas (AM) é de 1.27 m. Para o porto da Figueira da Foz, imediatamente a sul da área de estudo, esses valores são de 2.99 m (AV) e de 1.40 m (AM).

A máxima amplitude prevista de marés vivas atinge valores da ordem dos 3.7 m na Figueira da Foz e de 3.3 m em Aveiro, enquanto que a mínima amplitude de marés mortas chega a ser inferior a 1 m, em ambos os portos. O máximo valor absoluto anual (1997) previsto, acima do Zero Hidrográfico (ZH), é de 3.96 m ZH para o marégrafo da Figueira da Foz e de 3.64 m ZH para o marégrafo da barra de Aveiro.

As diferenças registadas nos valores absolutos e nas amplitudes, entre os dois locais, poderão ser devidas a diferenças de posicionamento dos marégrafos. Apesar de ambos os marégrafos se situarem dentro das estruturas portuárias existentes na desembocadura da laguna de Aveiro e no estuário do rio Mondego, o marégrafo de Aveiro parece denotar um maior efeito dessas mesmas estruturas e, provavelmente, do próprio sistema lagunar. O marégrafo da Figueira da Foz parece reproduzir melhor as condições ao largo, sendo mais concordante com os dados dos restantes marégrafos da costa oeste, nomeadamente de Peniche, Leixões e de Viana do Castelo.

##### 3.1.2. Agitação marítima

###### 3.1.2.1. Agitação ao largo

A caracterização do regime de agitação marítima na costa oeste portuguesa tem sofrido grande incremento nas últimas décadas, quer devido à melhoria dos

métodos e dos dados disponíveis, quer pelo aumento do número de trabalhos publicados sobre o assunto. Se até aos anos sessenta, o conhecimento da agitação era apenas baseado em observações visuais pontuais, efectuadas a partir de navios, hoje em dia é possível uma comparação de dados diversos, desde a observação visual à utilização de modelos numéricos, passando pela análise dos registos contínuos das bóias-ondógrafo.

Dentro do panorama nacional, a região da Figueira da Foz é, conjuntamente com Sines, das que possui maior e melhor conjunto de dados relativamente à agitação, sendo frequentemente utilizada para a caracterização do regime de agitação ao largo, na costa oeste portuguesa.

O primeiro trabalho com observações sistemáticas da agitação foi realizado entre 1954 e 1960, na Figueira da Foz, recorrendo à estimativa visual das características da agitação a partir da Torre do Relógio da marginal e com o apoio de uma bóia colocada no mar, a cerca de 1400 m do ponto de observação. Os valores obtidos foram extrapolados para as condições ao largo e analisados por Carvalho e Barceló (1966), que apontam as principais características da agitação, bem como os inconvenientes das aproximações utilizadas.

De acordo com estes autores, os rumos mais frequentes (cerca de 28% das ocorrências) foram de N80W a N70W, enquanto que as ondas do quadrante SW apenas representaram 20% do total observado. Os períodos significativos ( $T_s$ ) modais estiveram compreendidos entre 9 s e 11 s, sendo os extremos de 6 s e 18 s. As alturas significativas ( $H_{so}$ ) estimadas, ao largo, chegaram a atingir valores máximos de 11 m, estando a classe modal compreendida entre 1 m e 2 m, com 45% das ocorrências. Valores de  $H_{so}$  superiores a 6 m correspondem a apenas 2% das ocorrências registadas e os períodos de calma a 6% do tempo de observações.

Carvalho e Barceló (1966) não apresentam uma distribuição mensal ou sazonal do regime de agitação, apontando apenas uma aproximação a essas variações. Os autores observaram que as ondas provenientes do quadrante NW ocorrem em qualquer época do ano, enquanto que rumos de SW se concentram nos meses de Inverno, praticamente não existindo durante o Verão. Relativamente à gama de períodos significativos ( $T_s$ ), esta mantém-se uniforme ao longo de todo o ano, registando-se apenas uma tendência para uma ligeira diminuição dos valores nos meses de Verão. Pelo contrário, os valores máximos mensais de  $H_{so}$  possuem variabilidade acentuada,

tendo-se observado valores máximos próximos de 4 m, em Julho, e de 11 m, em Dezembro e Janeiro.

Teixeira (1994), com base nos dados de Carvalho e Barceló (1966), determina valores médios anuais para os parâmetros referidos, apresentando uma altura significativa média anual ( $\bar{H}_{50}$ ) de 1.8 m e um período significativo médio anual ( $\bar{T}_z$ ) de 11.1 s, para um rumo médio proveniente de 285° (N75W).

As características médias do regime de agitação atrás apontadas não são muito diferentes das obtidas por Pires e Pessanha (1986a) após análise de uma série de observações de quase quatro anos (1976/1980) para o Cabo da Roca, tendo registado  $\bar{H}_{50} = 2.0$  m e um período médio ( $\bar{T}_z$ ) de 8.0 s. Estes autores consideram que, em primeira aproximação, o clima de agitação deduzido dos registos do Cabo da Roca é representativo do clima de agitação marítima da parte norte da costa oeste portuguesa, e como tal comparável aos valores obtidos para a Figueira da Foz.

M. Costa (1987) analisou os dados de um ano de observações, obtidos entre Maio de 1984 e Abril de 1985, ao largo da Figueira da Foz. Os dados foram registados através de um ondógrafo direccional, colocado ao largo, num local onde a profundidade atingia 92 m, sendo os registos efectuados durante 20 minutos, a cada 3 horas. Sempre que o nível da altura de onda excedia os 5 m, o registo passava a ser efectuado a cada 30 minutos. As alturas significativas mais frequentes, com 43.4% das ocorrências, situaram-se entre 1 m e 2 m. As observações de temporal ( $H_{50} > 5$  m) corresponderam a apenas 2% do total e as situações de calma ( $H_{50} < 0.5$  m) a 1%. O valor de  $\bar{H}_{50}$  obtido foi de 2.09 m, enquanto que a máxima altura significativa observada atingiu os 7.25 m. Os períodos médios ( $T_z$ ) mais frequentes estiveram entre 5 s e 7 s, com cerca de 40% das ocorrências, situando-se os períodos significativos predominantes na classe de 7 s a 9 s, com 35% do total observado. A média dos períodos médios ( $\bar{T}_z$ ) obtidos foi de 7.0 s. A direcção predominante esteve centrada em WNW, com 70.5% dos registos, enquanto que os rumos centrados em W e NW possuíram apenas 16.4% e 12.2% das ocorrências. Os restantes rumos foram pouco significativos quando comparados com os anteriormente referidos. O rumo médio obtido, utilizando os dados mencionados e o azimute central como representante da totalidade de valores adstritos, foi de 291°. M. Costa (1987) alerta para a possibilidade dos rumos estarem afectados por efeitos de refacção, visto terem sido obtidos mais

próximo da costa do que os restantes parâmetros.

C. Costa (1994) e M. Costa (1994a,b), tendo por base os dados obtidos durante o programa NATO PO-WAVES, apresentam o mais completo conjunto de dados no que respeita à caracterização da agitação marítima na costa portuguesa. Para a área em estudo, os dados utilizados dizem respeito a 7034 registos obtidos durante 32 meses, entre 1990 e 1993, na estação da Figueira da Foz. Após tratamento dos dados, foram obtidos valores de altura significativa ao largo ( $H_{so}$ ), período médio ( $T_z$ ), período de pico ( $T_p$ ) e de rumo médio associado ao período de pico. Para estes parâmetros são apresentados valores mínimos, máximos e médios, mensais e anuais, bem como as suas médias para os períodos de Verão, de Inverno e para a globalidade do ano. Os valores médios anuais obtidos são  $\bar{H}_{so} = 2.2$  m,  $\bar{T}_z = 7.2$  s e  $\bar{T}_p = 11.3$  s. Relativamente aos rumos, os autores apresentam as frequências de cada rumo, separadas por octantes, bem como as alturas e os períodos médios associados. De uma forma geral, os rumos predominantes são de NW, com 72.7% das ocorrências, os rumos de W possuem apenas uma frequência de 16.3% e os rumos de SW são muito pouco expressivos, com 2.7% das ocorrências. Relativamente ao trabalho de Carvalho e Barceló (1966), os rumos agora expressos estão mais rodados a norte, o que é natural se atendermos a que as observações de 1954/60 foram efectuadas junto à praia, a sul do Cabo Mondego, e como tal não possuem uma gama elevada de valores de agitação do quadrante NW, por efeito de sombra do referido cabo. Por outro lado, os valores de Carvalho e Barceló (1966) estariam mais actuados pela refração, contribuindo para um menor conjunto de rumos provenientes de NW.

Na distribuição conjunta de  $H_{so}$ ,  $T_p$  e de rumos, as classes com maior percentagem de ocorrência correspondem a alturas de onda entre 1 m e 3 m, para períodos associados de 9 s a 13 s, com rumo de NW, contando esta conjugação para uma ocorrência total da ordem dos 50%. Alturas superiores a 5 m e períodos maiores do que 13 s foram apenas registados conjuntamente com rumos de NW e de W, salvo raras excepções.

Na tabela 3.1. apresenta-se um resumo das condições médias e modais da agitação ao largo obtidas para a Figueira da Foz, utilizando os valores apontados nos vários trabalhos referidos e algumas estimativas efectuadas com base nos dados mencionados.

Tabela 3.1. Resumo dos valores médios e modais anuais dos parâmetros de agitação na Figueira da Foz.

Condições médias anuais				
Referência	Tipo de observação	H <sub>50</sub> (m)	T (s)	Rumo (°)
Teixeira (1994)*	Observação visual	1.8	11.1 (T <sub>s</sub> )	285
M. Costa (1987)	Bóia ondógrafo	2.1**	7.0 (T <sub>z</sub> )**	291**
C. Costa (1994)	Bóia ondógrafo	2.2	11.3 (T <sub>p</sub> )	309***
M. Costa (1994b)				
Condições modais anuais				
Referência	Tipo de observação	H <sub>50</sub> (m)	T (s)	Rumo (°)
Carvalho e Barceló (1966)	Observação visual	1 - 2	9 - 11 (T <sub>s</sub> )	280 - 290
M. Costa (1987)	Bóia ondógrafo	1 - 2	5 - 7 (T <sub>z</sub> )	WNW 281.3-303.7
M. Costa (1994b)	Bóia ondógrafo	1 - 2	5 - 7 (T <sub>z</sub> )	NW 292.5-337.5
C. Costa (1994)	Bóia ondógrafo	1 - 3	11 - 13 (T <sub>p</sub> )	NW 292.5-337.5

\* Estimado com base nos dados de Carvalho e Barceló (1966).

\*\* Estimado com base nos dados de M. Costa (1987).

\*\*\* Estimado com base nos dados de C. Costa (1994).

### 3.1.2.2. Agitação na rebentação

Tendo por base os valores de altura significativa de Carvalho e Barceló (1966), obtidos junto à costa e transpostos para o largo, e o trabalho de Hidrotécnica Portuguesa sobre as condições de refração na costa entre Espinho e o Cabo Mondego, Teixeira (1994) e Tomás (1995) apontam valores para as condições de agitação na rebentação no troço costeiro em estudo. Os autores recorreram à metodologia de Le Mehauté e Wang (1980) para o cálculo de H<sub>bs</sub> (altura significativa na rebentação). Esta solução introduz no cálculo de H<sub>bs</sub> o valor do declive da praia submersa e utiliza o “shoaling coefficient” (índice ou coeficiente de aproximação). Assim, o valor da agitação na rebentação torna-se dependente das condições ao largo, da batimetria próxima e do pendor da praia. Teixeira (1994) assume que as condições de agitação ao largo são iguais para todo o troço costeiro em questão e que as condições de refração não sofrem alterações significativas devido à regularidade do litoral e à batimetria quase paralela, considerando que a variação da altura na rebentação é sobretudo controlada pela variação no declive da praia submersa.

Para o cálculo do declive da praia submersa, Teixeira (1994) utiliza a linha de costa e a batimétrica dos -10 m ZH, recorrendo à Carta Hidrográfica nº2, do Instituto

Hidrográfico, à escala 1:150 000. Os valores de declive obtidos para os quatro locais analisados por este autor, dentro da área em estudo, variaram entre 0.006 e 0.016 de norte para sul, isto é, de Vagueira ao Cabo Mondego. De acordo com o método utilizado, e não considerando variações significativas nos outros parâmetros, a um aumento do pendor corresponde um aumento da altura média anual ( $\bar{H}_b$ ) determinada, que variou entre 1.74 m (Vagueira) e 1.99 m (Cabo Mondego). De acordo com Teixeira (1994), a relação entre  $H_b$  e  $H_{s0}$  para a generalidade do troço costeiro entre Espinho e o Cabo Mondego (com declive médio de 0.007) pode ser dada por:

$$H_b = 0.4 + 0.77H_{s0} \quad (3.1)$$

sendo a relação apenas válida para cada escalão unitário de alturas de ondulação. Esta relação representa uma média obtida com base num conjunto de alturas ao largo, não estabelecendo variações de acordo com mudanças no ângulo de ataque ao largo ( $\alpha_0$ ). Na realidade, para iguais valores de  $H_{s0}$  existirão diferentes valores de  $H_b$ , de acordo com o rumo da ondulação incidente. É ainda de referir que dado a equação não passar pela origem, as ondas de pequeno porte poderão ter valores de  $H_b$  sobrestimados (o valor mínimo é sempre 0.4 m).

Tomás (1995) utilizou a batimétrica dos -20 m ZH para o cálculo do pendor da praia submersa, concluindo igualmente do aumento de pendor e, conseqüentemente, da altura da onda na rebentação, de norte para sul. Para condições de  $H_{s0} = 2$  m e  $T = 10$  s, com rumos de W10N, W15N, W20N (condições mais frequentes de acordo com Carvalho e Barceló, 1966), a altura na rebentação estimada varia entre 2.14 m (Vagueira) e 2.32 m (Quiaios). O autor calculou, ainda, a altura da onda na batimétrica dos -7 m ZH (próximo da rebentação), desde Espinho a Quiaios, recorrendo aos dados de Hidrotécnica Portuguesa e à teoria da onda linear. Neste caso, não foi possível concluir do possível aumento da altura da onda de norte para sul. Pelo contrário, para alguns períodos de agitação parece haver uma clara tendência de decréscimo, no mesmo sentido (vide figuras 1.11 e 1.12 em Tomás, 1995).

Apesar dos valores determinados por Teixeira (1994) e por Tomás (1995) serem os únicos que permitem estimar o comportamento da agitação na rebentação ao longo da área de estudo, a sua obtenção possuiu algumas incertezas, devido à base

batimétrica utilizada, às profundidades de fecho consideradas (sobretudo por Tomás) e à não variabilidade da profundidade de fecho considerada (se variam as alturas ao longo da área, têm de variar obrigatoriamente as profundidades de fecho dos perfis). A utilização dos dados de Carvalho e Barceló (1966), que possuem altura média inferior em 0.4 m aos de C. Costa (1994) e rumos médios deslocados para sul, por efeito de sombra do Cabo Mondego na aquisição dos dados, pode igualmente contribuir para um menor rigor dos resultados obtidos.

Utilizando a mesma metodologia que Teixeira (1994) e Tomás (1995), para os declives da praia submersa propostos por Teixeira e recorrendo à altura significativa média anual e ao período de pico médio anual de C. Costa (1994), obtêm-se valores de altura média significativa anual entre 2.22 m (Vagueira) e 2.56 m (Quiaios), para a área em questão.

Na tabela 3.2. apresenta-se um resumo das condições de agitação na rebentação, de acordo com os vários autores, usando a solução de Le Mehauté e Wang (1980), para quatro locais da área de estudo.

**Tabela 3.2.** Resumo dos valores anuais da altura da agitação na área em estudo.

Referência	Alturas significativas médias anuais na rebentação (m)				
	Dados de base	Vagueira	P. Mira	P. Tocha	P. Quiaios
Teixeira (1994)*	Carvalho e Barceló (1966)	1.74	1.77	1.92	1.99
Tomás (1995)**	Carvalho e Barceló (1966)	2.14	2.17	2.26	2.32
Presente trabalho*	C. Costa (1994)	2.22	2.27	2.45	2.56

\* Valores médios anuais

\*\* Valores modais

Utilizando os dados de agitação de C. Costa (1994) e a mesma metodologia, mas usando as profundidades de fecho determinadas por Ferreira (1993) para os perfis respeitantes às localidades analisadas, verifica-se que o valor de  $\bar{H}_b$  não se altera ao longo da área, sendo de 2.39 m. Tal fica-se a dever a uma relativa uniformidade do declive da praia submersa ao longo da área estudada ( $\approx 0.01$ ), entre 0 m ZH e a profundidade de fecho em cada perfil. No entanto, este valor está ainda incorrecto no que respeita à aplicação do método de Le Mehauté e Wang (1980), visto que considera um pendor geral entre os 0 m e a profundidade de fecho, em cada perfil. Na realidade, o efeito de "shoaling" não se faz sentir sobre um perfil médio mas sobre a barra externa, cuja face voltada ao largo possui um pendor médio de 0.023, obtido pela média dos levantamentos batimétricos de 1987 e de 1990. Este declive mais acentuado

vai permitir um maior empolamento da onda. Desta forma, refazendo os cálculos para estas condições de declive e para os dados de agitação de C. Costa (1994) o valor de  $\bar{H}_b$  passa a ser de 2.90 m. Por forma a aquilatar da variabilidade existente entre formulações de previsão, testaram-se ainda as equações propostas por Komar e Gaughan (1972) e por Munk (1949). Os valores obtidos foram, respectivamente, de 3.03 m e de 2.96 m, evidenciando concordância com o anteriormente calculado, apesar de não incluírem efeito de refacção.

### 3.1.3. Tempestades

#### 3.1.3.1. Ocorrência, intensidade e rumos

São poucos os trabalhos que permitem caracterizar com rigor o regime de temporais na costa oeste de Portugal Continental, contendo dados exactos e sistemáticos sobre altura, período, rumo, duração, etc. Os trabalhos existentes têm por base a análise de dados históricos, originários de fontes diversas, desde registos em ondógrafos a notícias de jornais.

Pita e Santos (1989) realizaram uma compilação de dados dos temporais ocorridos na costa oeste portuguesa, entre 1956 e 1988, tendo identificado um total de 97 temporais. Para a obtenção dos dados os autores recorreram a previsões e a registos de 12 locais ao longo da costa, cobrindo no seu conjunto cerca de 93% do período total de observação. Para além da possibilidade de alguns temporais não terem sido observados, raramente se obtiveram valores exactos das máximas alturas significativas ( $H_{smax}$ ), pelo que a cada temporal corresponde frequentemente um intervalo de valores de  $H_{smax}$ . Em alguns casos os autores consideraram como temporais alguns períodos de agitação onde não ocorreram valores de  $H_{smax}$  superiores a 5 m (limite mínimo a partir do qual se considera a ocorrência de temporal, na costa oeste portuguesa).

Capitão (1992) apresenta uma síntese dos dados de temporais existentes no LNEC, entre 1955 e 1989, discriminando os valores de  $H_s$ ,  $H_{max}$ ,  $T_z$  e rumo para cada evento, ainda que com algumas lacunas. A base de dados apresentada foi genericamente a mesma que a utilizada por Pita e Santos (1989).

Mais recentemente, Andrade *et al.* (1996), tendo por base a análise de um jornal nacional, estudaram os registos de temporais para a costa de Espinho ao Cabo Mondego, num período de 127 anos (1865 - 1992), contribuindo significativamente para a melhoria da caracterização do regime de temporais nesta costa. Os dados obtidos pelos autores foram confrontados com os de Pita *et al.* (1987) e de Pita e Santos (1989), tendo-se concluído da sua boa qualidade, viabilizando assim a informação obtida através da análise de dados de arquivo.

Qualquer dos trabalhos referidos é concordante na separação de um “Inverno” e de um “Verão” marítimo, decorrendo o primeiro de Outubro a Março e o último de Abril a Setembro. Pita e Santos (1989) apontam para o “Inverno” marítimo cerca de 94.8% das ocorrências de temporais, enquanto que Andrade *et al.* (1996) indicam apenas 84%, atribuindo os restantes 16% de ocorrências de temporais ao período de “Verão” marítimo, possuindo esses temporais baixa intensidade e curta duração (um a dois dias).

Para Pita e Santos (1989), cerca de 50% das  $H_{smax}$  anuais deverão exceder um valor entre 7.1 m e 9.8 m e em 25% dos casos (uma vez em cada 4 anos) será excedido um valor entre 8.9 m e 11.9 m. No entanto, os eventos mais frequentes são os que possuem  $H_{smax}$  entre 5 m e 6 m, com uma percentagem de ocorrência de 57% a 91% relativamente à totalidade de temporais ocorridos. Os registos com valores superiores a 10 m constituem entre 3% a 17% das ocorrências.

Andrade *et al.* (1996) distribuem os registos obtidos de acordo com três classes de intensidade, sendo a classe 3 a mais intensa, representando 12% das ocorrências. De acordo com a comparação entre os dados de arquivo e os dados de instrumentação, os autores concluem que os temporais da classe 3 corresponderão a situações com  $H_{smax}$  igual ou superior a 10 m. Estimam ainda que um evento típico de classe 3 dura 6.6 dias e ocorre uma vez em cada três anos, em média.

De acordo com os dados de Pita e Santos (1989) ocorrem, em média, três temporais/ano na costa oeste portuguesa, apontando<sup>3</sup> Andrade *et al.* (1996) um valor muito próximo do anterior (2.7 eventos/ano). A duração média de cada temporal é de 4.3 dias, para os dados obtidos através de registo em jornais, e de 4.0 dias para os dados de Pita e Santos, de acordo com a análise feita por Andrade *et al.* (1996). A máxima extensão de temporal contínuo encontrada foi de 14 dias para os registos de Pita e Santos (1989) e de 26 dias para os dados de Andrade *et al.* (1996).

Andrade *et al.* (1996), tendo por base a aplicação da regressão linear aos dados das 342 tempestades observadas em 127 anos de registos, consideram que tem havido uma tendência para o aumento generalizado da frequência, da intensidade e da duração média dos temporais, desde 1865 até 1992, ainda que com uma variabilidade de década para década muito superior à tendência de aumento.

Relativamente à distribuição de temporais de acordo com o rumo, os dados existentes são mais escassos e, normalmente, de menor fiabilidade do que os anteriormente apresentados. Pita e Santos (1989) expressam rumos de 67 dos 97 temporais observados, mas obtidos com pouco rigor e em locais com importantes efeitos de refração. É apenas possível concluir que a quase totalidade dos rumos provêm de W e de WNW. C. Costa (1994), nos 32 meses de observações regista 2.0% de agitação relativa a condições de temporal, tendo 1.9% das observações rumos de NW e apenas 0.1% de W, não ocorrendo registos de temporais do quadrante SW. M. Costa (1994b) refere que, na Figueira da Foz, os temporais mais violentos são os que provêm de NW a WNW, sendo as restantes direcções quase inexpressivas, para os dados obtidos. Qualquer dos resultados acima referidos é concordante com as conclusões já apontadas por Carvalho e Barceló (1966), para os quais as tempestades tendem a provir de NW, enquanto que as de SW são pouco frequentes.

#### 3.1.3.2. Períodos de retorno

Os primeiros autores a publicarem valores de altura de ondas para períodos de recorrência de tempestades na costa ocidental portuguesa, com base no tratamento estatístico de séries de observações, foram Pires e Pessanha (1986a,b), para a estação de Sines. Estes autores ensaiaram ainda o estudo da estação do Cabo da Roca, tendo verificado que os lapsos de registo na série de observações não permitiriam a obtenção de resultados fiáveis. No entanto, foi possível determinar que os valores registados no Cabo da Roca eram, em média, 1.3 vezes superiores aos verificados em Sines, permitindo a extrapolação dos períodos de retorno para a Roca, com base nos resultados de Sines.

Na tabela 3.3. são apresentados os valores obtidos para as duas estações referidas, para temporais com  $H_{smax} > 5$  m.

**Tabela 3.3.** Valores de  $H_{smax}$  (em metros) associados a diferentes períodos de retorno, para Sines e Cabo da Roca (Pires e Pessanha, 1986a,b).

Período de retorno (anos)	Sines	Cabo da Roca
5	7.5	9.8
10	8.2	10.7
25	9.1	11.8
50	9.8	12.7
100	10.5	13.7

Sendo do conhecimento geral que a violência dos temporais diminui à medida que se progride para sul (Carvalho e Barceló, 1966), o que é consubstanciado pelos resultados comparativos entre o Cabo da Roca e Sines (Pires e Pessanha, 1986 a,b) e entre Figueira da Foz e Sines (M. Costa, 1994b), é possível que os valores de  $H_{smax}$  associados a iguais períodos de retorno, para a Figueira da Foz, sejam um pouco superiores aos registados na Roca.

Ferreira (1993), tendo por base uma análise simples dos dados de Pita e Santos (1989), determinou intervalos de retorno para alturas de onda entre 5 m e 12 m, estando os valores expressos na tabela 3.4.

**Tabela 3.4.** Períodos de retorno associados a valores de  $H_{smax}$  para a costa oeste portuguesa de acordo com Ferreira (1993).

$H_{smax}$ (m)	Período de retorno (anos)
5	0.4
6	0.6
7	1.0
8	1.6
9	2.7
10	4.9
11	9.6
12	18.7

Pela análise da tabela, é possível verificar que os valores de alturas de onda associados aos períodos de retorno apontados se aproximam bastante dos obtidos através dos dados de Pires e Pessanha, para o Cabo da Roca. Períodos de retorno de 5 e de 10 anos terão, de acordo com a tabela 3.4., valores de  $H_{smax}$  próximos de 10 m e de 11 m, enquanto que para a Roca esses valores são de 9.8 m e 10.7 m, respectivamente. Parece, assim, que os valores expostos nestas duas tabelas (3.3. e 3.4.) poderão ser considerados adequados para a previsão dos períodos de retorno de  $H_{smax}$  para a generalidade da costa oeste portuguesa.

Carvalho (1992) calcula o regime de condições extremas para a Figueira da

Foz utilizando dois métodos de análise (Gumbel e Fréchet), prevendo períodos de retorno para máximas alturas significativas ( $H_{smax}$ ) e para alturas máximas anuais ( $H_{max}$ ). Os valores obtidos pelo autor estão expostos na tabela 3.5.

Tabela 3.5. Valores de  $H_{smax}$  e de  $H_{max}$  (em metros) associados a diferentes períodos de retorno, para a Figueira da Foz (Carvalho, 1992).

Período de retorno (anos)	$H_{smax}$ (m)		$H_{max}$ (m)	
	Gumbel	Fréchet	Gumbel	Fréchet
10	9.5	10.0	16.0	17.0
50	11.5	13.6	19.5	23.3
100	12.4	15.5	20.9	26.6

Os valores obtidos pelo autor são de forma genérica concordantes com os já apontados para o Cabo da Roca, caindo estes últimos próximo ou dentro do intervalo de valores considerado pelos dois métodos, para  $H_{smax}$ .

#### 3.1.4. Sobrelevação do nível do mar (“storm surge”)

O estudo da sobrelevação do nível do mar em Portugal no decurso de temporais tem mostrado grande incremento nos últimos anos. Até ao início dos anos 90 apenas existia um trabalho publicado (Morais e Abecasis, 1978), onde se apontava um valor de sobrelevação máxima de 0.53 m para o porto de Leixões, durante um temporal de Janeiro de 1973.

O primeiro estudo sistemático de sobrelevação, em Portugal, foi efectuado por Taborda e Dias (1992), que analisaram os registos de todos os marégrafos principais de Portugal Continental, para duas tempestades (Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1991). De acordo com os autores, registaram-se valores máximos de 0.9 m em Viana do Castelo, para o temporal de 1978, e de 1.2 m em Aveiro, durante o temporal de 1981. Os níveis máximos do mar atingidos (maré + sobrelevação) foram de 4.3 m em Lisboa (temporal de 1978) e de 4.0 m em Viana do Castelo (temporal de 1981). Este estudo enfatizava a necessidade de se proceder a uma análise estatística da informação disponível, por forma a determinar períodos de retorno da elevação do nível do mar, associados ou não a temporais, ao longo da costa portuguesa. Neste sentido, e seguindo a mesma linha de investigação, surge o trabalho de Gama *et al.* (1994a) que caracteriza pela primeira vez a sobrelevação do nível do mar num

período alargado, entre Junho de 1986 e Maio de 1988, para sete marégrafos da costa portuguesa (Viana do Castelo, Aveiro, Cascais, Lisboa, Tróia, Sines e Lagos). Nesse trabalho, o cálculo da sobrelevação foi efectuado pela diferença entre os valores observados e previstos da maré, em cada hora, para cada estação, durante a totalidade dos dois anos de observação. Alguns dados foram excluídos por terem qualidade duvidosa ou por mau funcionamento do marégrafo, tendo-se obtido um aproveitamento entre o máximo de 93.4% (Lisboa) e o mínimo de 60.2% (Tróia). O marégrafo de Aveiro obteve um aproveitamento de dados de 87.1%.

Com os dados obtidos, os autores elaboraram curvas de frequência cumulativa, para cada estação maregráfica, tendo-se procedido a uma análise estatística da distribuição das frequências, sendo definidas para cada estação as seguintes três classes de sobrelevação, numa base anual:

- Sobrelevação significativa (acima do percentil 95);
- Sobrelevação muito significativa (acima do percentil 99);
- Sobrelevação extremamente significativa (acima do percentil 99.9).

Na tabela 3.6. estão expressos os valores máximos e mínimos de cada nível significativo, para a generalidade da costa oeste, bem como os valores registados na estação de Aveiro.

**Tabela 3.6.** Níveis máximos e mínimos de sobrelevação significativa para a globalidade das estações observadas e para a estação de Aveiro (Gama *et al.*, 1994a).

Tipo de sobrelevação	Níveis máximos e mínimos (cm)	Aveiro (cm)
Sobrelevação significativa	23(Lisboa) - 39(Viana)	31
Sobrelevação muito significativa	29(Lisboa) - 54(Viana)	42
Sobrelevação extremamente significativa	39(Lisboa) - 90(Viana)	67
Máximo valor de sobrelevação	48(Lisboa) - 110(Viana)	78

Para o período estudado, o valor máximo registado foi sempre superior a 40 cm, em qualquer das estações, com um máximo absoluto de 1.1 m em Viana do Castelo, para a tempestade de 14 a 16 de Outubro de 1987. Este máximo foi obtido durante a maré baixa de marés mortas, pelo que o nível do mar atingido foi apenas de cerca de 2.5 m ZH. Se o episódio tivesse ocorrido durante a maré alta de marés-vivas, o nível do mar poderia ter atingido um valor próximo de 5 m ZH (Gama *et al.*, 1994a).

Os autores deste estudo de sobrelevação chamam a atenção para a influência das condições locais nos níveis de sobrelevação, distinguindo dois grupos de

marégrafos, com base nos seus comportamentos. Os marégrafos de Cascais, Lisboa, Tróia e Sines apresentam valores de sobreelevação normalmente menores do que os marégrafos de Viana do Castelo, Aveiro e Lagos, sendo o de Aveiro o segundo marégrafo com índices estatísticos de sobreelevação mais elevados, imediatamente após o de Viana do Castelo.

No que respeita ao cálculo do período de retorno para níveis extremos do mar, os mesmos autores, numa outra publicação (Gama *et al.*, 1994b), analisam a acção combinada de marés e sobreelevação em três marégrafos (Viana do Castelo, Cascais e Lagos). Para tal, usam os dados de sobreelevação dos dois anos analisados (Junho de 1986 a Maio de 1988) conjuntamente com os dados de previsão de maré para cinco anos (1991 - 1995). O método de cálculo das elevações associadas a períodos de retorno consistiu na combinação das funções de probabilidade de ocorrência de níveis de sobreelevação e de níveis de maré, admitindo que em cada momento o nível do mar observado corresponde à soma de uma componente de maré e de uma componente de sobreelevação, sobre um nível base. Os resultados obtidos estão sumariados na tabela 3.7..

Tabela 3.7. Elevação do nível do mar acima do ZH (cm) para os períodos de retorno associados (Gama *et al.*, 1994b).

Período de retorno (anos)	Viana do Castelo	Cascais	Lagos
10	461	415	423
25	471	419	429
50	478	422	434

Pela análise dos resultados, Gama *et al.* (1994b) concluem que a períodos de retorno relativamente curtos estão associados níveis extremos elevados. A estação de Viana é aquela que apresenta níveis mais altos, sendo também a que tende a possuir valores mais próximos dos que se farão sentir ao largo de Aveiro e, como tal, junto à costa em estudo.

O estudo dos factores condicionantes da ocorrência de sobreelevação do nível do mar foi objecto de trabalho por Gama *et al.* (1995), que estudaram uma série anual (1987), para a estação de Viana do Castelo. Os autores concluíram que a sobreelevação se correlaciona fortemente com as condições meteorológicas locais, nomeadamente com a pressão barométrica e com o vento, tendo pouca ou nenhuma dependência de factores como a maré ou a agitação marítima ao largo.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO

A faixa continental adjacente ao litoral entre Aveiro e o Cabo Mondego corresponde, de forma geral, a uma zona aplanada e de baixa altitude. O relevo mais importante é a Serra da Boa Viagem, no limite sul da área de estudo, com cerca de 257 m de altitude máxima. Para além deste relevo, toda a restante área pode ser considerada como pertencente a uma planície costeira (Vanney e Mougenot, 1981; Bettencourt e Ângelo, 1992), de elevada uniformidade topográfica, que se estende desde Espinho até próximo da Nazaré.

#### 3.2.1. Corpos lagunares

Os corpos lagunares possuem grande importância na área de estudo, não só fisiográfica mas, também, socialmente. A zona húmida dominante é a Laguna de Aveiro, na qual desagua o rio Vouga. Esta laguna possui extensos depósitos aluvionares formando, por vezes, ilhas e ilhotas, destacando-se de entre estas as de Testada e de Monte Farinha, pelas áreas que ocupam.

Na zona de estudo a Laguna de Aveiro está representada apenas pelo braço de Mira, que tem vindo a apresentar alguma assoreamento, levando à sua recente dragagem. Este braço está separado do mar por cordão arenoso de largura variável (com distâncias mínimas de 200 m).

A laguna comunica com o oceano através da barra artificial de Aveiro. Actualmente, grande parte da laguna encontra-se ocupada por salinas, instalações portuárias e industriais, aterros, estradas, etc., responsáveis por modificações profundas na sua morfologia natural.

Um outro corpo lagunar digno de registo, próximo à área em estudo, é a Barrinha de Mira, em Praia de Mira, que constitui uma pequena lagoa (800 m de largura por 1000 m de comprimento), pouco profunda e de contornos, em grande parte, artificiais. Menciona-se, ainda, a existência de lagoas internas, tais como as lagoas das Teixoeiras, da Salgueira, da Vela e das Braças, entre Tocha e Quiaios.

### 3.2.2. Dunas

As dunas, holocénicas, existem ao longo de quase toda a área, sendo apenas interrompidas por povoações. Podem distinguir-se dois tipos principais de dunas, sendo um correspondente ao cordão dunar frontal e o outro às dunas interiores, que se podem diferenciar em vários sistemas, com formas e orientações distintas (Bettencourt e Ângelo, 1992; Noivo, 1996). A vastidão dos campos dunares desta zona reflecte o fornecimento sedimentar abundante que ocorreu em tempos históricos, tendo os sedimentos sido remobilizados eolicamente. Tal transporte provocou, durante séculos, a invasão dos terrenos de cultivo e das áreas habitacionais da região. Para minimizar estes efeitos procedeu-se, nas primeiras décadas do século, à estabilização da área dunar envolvente de Mira - Tocha, através da criação de pinhais.

O cordão dunar frontal estende-se de forma quase contínua ao longo da área de estudo, correspondendo, em grande parte, ao limite continental da praia emersa. Tomás (1995) verificou que existe paralelismo entre as direcções representativas da crista do cordão dunar e da face da praia, para o troço costeiro Espinho - Cabo Mondego. Assim sendo, a orientação genérica do cordão dunar será semelhante à direcção média do litoral em estudo (N14E, segundo Teixeira, 1994).

A cota da crista dunar, na área em estudo, varia entre os 7 m ZH e os 18 m ZH, de acordo com Tomás (1995), sendo a cota média a sul de Praia de Mira próxima de 15 m ZH. No entanto, é provável que os valores referidos tenham sido pontualmente alterados. A base de trabalho utilizada pelo autor parece corresponder à base cartográfica 1:25000, cujos trabalhos de campo e estereogrametria datam de 1973/1977. Relativamente à representação cartográfica citada, verificam-se actualmente algumas alterações. Nomeadamente, a inexistência de cordão dunar frontal em Costa Nova e em Vagueira e a ablação da crista dunar original em alguns locais, por recuo da linha de costa.

A erosão sentida nas últimas décadas tem ainda permitido a ocorrência de galgamentos oceânicos, originando leques de galgamento (Ferreira, 1993). Este autor refere, igualmente, a existência de corredores eólicos em locais de grande afluência às praias, pelo que, esporadicamente, a cota dunar é inferior às referidas.

Actualmente, a largura do cordão dunar frontal varia entre 0 m (inexistente) e cerca de 100 m, a norte da Praia de Mira, e de 200 m a 250 m a sul desta povoação,

até próximo do Cabo Mondego.

Para o interior do cordão dunar frontal ocorrem, paralelamente à linha de costa, zonas aplanadas ou depressões, com cotas pouco elevadas (+5 m ZH a +8 m ZH), que estão por vezes ocupadas com povoações ou por edificações dispersas. Estas áreas de cotas baixas contactam, ao longo da área em estudo, directamente com o braço de Mira ou com o vasto campo dunar formado pelas dunas interiores.

### 3.2.3. Praia emersa

Existe praia arenosa, exposta, ao longo de toda a área costeira em análise, sendo esta, por vezes, interrompida por algumas obras de engenharia costeira. A costa é, grosso modo, rectilínea, com orientação global entre N10E e N20E (Ferreira, 1993), e com valor médio próximo de N14E (Teixeira, 1994).

O contacto entre o cordão dunar frontal e a praia emersa é promovido por arriba talhada na duna, em quase toda a zona setentrional, até próximo de Canto do Marco. A sul deste local a transição é gradual, através de dunas embrionárias ou de antedunas (Ferreira, 1993). Apenas a sul da Praia de Quiaios, no início do Cabo Mondego, a praia arenosa é limitada para o interior por arribas vivas, talhadas em rochas consolidadas carbonatadas. O limite entre a praia emersa e a praia submersa pode ser definido pelo nível da máxima maré baixa (Ferreira, 1993). A largura da praia emersa é muito variável ao longo da área de estudo e até para o mesmo local, ao longo do tempo, tendo-se observado valores extremos entre 40 m e cerca de 180 m.

Na praia emersa podem distinguir-se três zonas, nem sempre presentes ao mesmo tempo (figura 3.1.). Os extremos de cada uma destas zonas possuem ligeiras alterações nos limites, de autor para autor, razão pela qual se expõem de seguida quais os limites utilizados no presente trabalho.

Alta Praia - Corresponde à área entre o contacto da praia com o seu limite continental (duna, arriba, paredão, etc.) e o início da berma, traduzido por uma ruptura de pendor. Esta superfície é normalmente aplanada, inclinando para o mar, podendo sobre ela ocorrer antedunas ou dunas embrionárias. Quando este sector não existe, o contacto entre a praia emersa e a duna é directamente promovido pela média praia ou pela baixa praia.

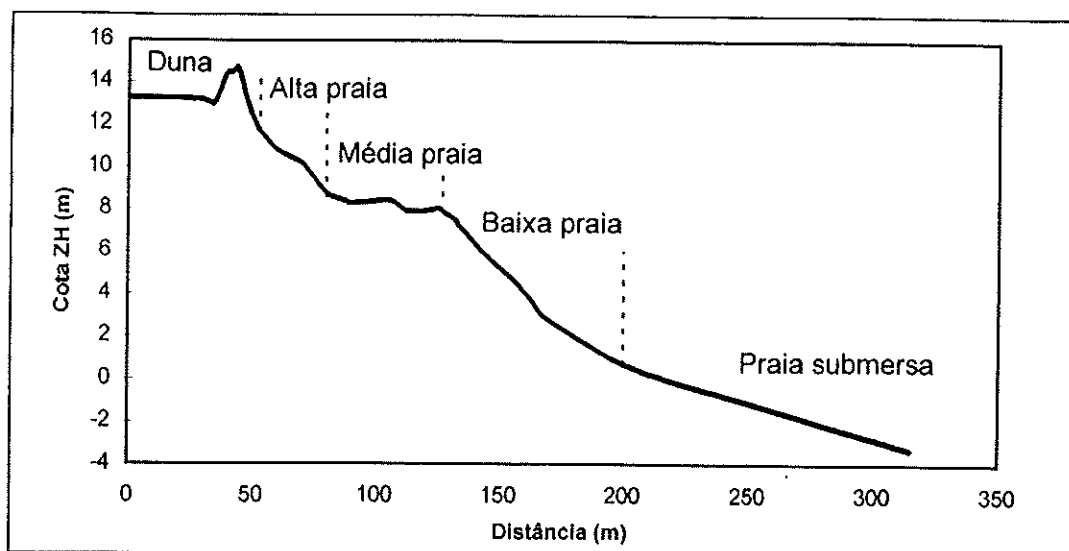


Figura 3.1. Morfologia da praia emersa (Praia de Quiaios).

Média Praia - É a zona intermédia da praia emersa, sendo constituída por uma ou mais bermas, normalmente horizontais a sub-horizontais ou ligeiramente inclinadas para terra. No caso de existirem duas ou mais bermas, estas encontram-se separadas por pequenas rupturas de pendor. A média praia tem por limite, para o mar, a crista da berma mais externa. As cotas máximas da crista da berma, na área em estudo, variam entre 6.3 m ZH e 8.2 m ZH, de acordo com os dados de perfis expressos em Tomás (1995). Teixeira (1994) considera que para a área entre Espinho e o Cabo Mondego os valores da cota da berma mais alta variam entre 7 m ZH, em Espinho, e cerca de 9 m ZH, em Praia de Quiaios.

Baixa Praia - A baixa praia corresponde à superfície entre a crista da berma mais externa e o nível de baixa-mar de maré viva, nela se situando a face da praia (zona actuada pelas ondas durante um ciclo de maré). Em alguns casos, normalmente associados a situações pós-temporal e/ou a áreas com carência sedimentar, a praia emersa é na sua totalidade constituída pela baixa praia, não ocorrendo nem média, nem alta praia.

A variabilidade anual do perfil de praia na área em estudo é elevada, havendo transição entre os tipos de configuração extremos, dissipativo e reflectivo, de acordo com a classificação proposta por Wright e Short (1983, 1984) e por Wright *et al.* (1985), associada a uma marcada variabilidade sazonal (Ferreira, 1993; Tomás, 1995).

Numa análise conjunta do comportamento geral do perfil de praia ao longo da zona entre Aveiro e o Cabo Mondego, Ferreira (1993) diferencia dois sectores (setentrional e meridional), com transição próxima de Praia de Mira. Segundo o autor,

o sector sul possui normalmente bermas bem desenvolvidas, sendo a alta praia frequente ao longo de todo o ano. Pelo contrário, no sector norte a alta praia não é frequente, mesmo durante o Verão, apenas existindo média e baixa praia ou só baixa praia, reflectindo a fragilidade que as praias deste sector possuem.

Relativamente às forma rítmicas, foram identificadas séries de "beach cusps" (lobos de praia, cúspides ou crescentes de praia), em sistemas únicos ou complexos, correspondendo cada sistema a uma antiga zona de face da praia, preservada pela adição de uma ou mais bermas (Ferreira, 1993). Tomás (1995), durante os trabalhos de campo, verificou igualmente a presença de "cusps" associadas aos estados intermédios de comportamento, cujos comprimentos de onda mais frequentes se situaram entre 30 m e 40 m, com uma média de 34 m, para o sistema mais baixo no perfil.

Ferreira (1993) aponta ainda a existência de outra forma rítmica, de grande comprimento de onda (cerca de 1.5 km), que poderá corresponder à agradação à praia de barras submersas em crescente (Komar, 1976; Holman e Bowen, 1982).

Qualquer das morfologias rítmicas longilitorais citadas anteriormente contribui para um aumento na variabilidade nos perfis de praia emersa, levando à existência de modificações longilitorais para iguais condições energéticas.

#### 3.2.4. Praia submersa

A praia submersa, ou submarina, estende-se desde a linha de máxima baixa-mar de maré vivas até ao limite no mar, denominado profundidade de fecho, estabelecido pela profundidade abaixo da qual não se verificam variações morfológicas nem trocas sedimentares apreciáveis, numa escala temporal definida. Assim, a largura da praia submersa torna-se dependente das condições de agitação vigentes no período definido e, conseqüentemente, da própria escala temporal considerada (Teixeira, 1994).

A profundidade de fecho pode ser determinada por comparação directa de perfis batimétricos de datas distintas, ou estimada numa base anual, através das equações propostas por vários autores (Hallermeier, 1981a,b; Birkemeier, 1985). Ferreira (1993) efectuou a comparação morfológica, entre dois levantamentos batimétricos de datas diferentes (Maio/Setembro de 1987 e Dezembro de 1990), apontando valores de fecho do perfil entre os -8.0 m ZH e os -11.5 m ZH, quase coincidentes com o limite externo de variação da barra submersa. Estes valores são um

pouco inferiores às profundidades de fecho calculadas por Teixeira (1994), com base nas equações de Hallermeier, que se situam entre os -14.2 m ZH e os -16.5 m ZH, utilizando os valores de agitação ao largo. Teixeira (1994) efectuou, ainda, uma análise comparativa de 16 levantamentos batimétricos obtidos entre 1967 e 1982, para a praia de S. Jacinto, concluindo que a profundidade de fecho se deveria situar nos -12 m ZH, valor próximo dos obtidos por Ferreira (1993) e inferior aos baseados nas equações de previsão.

Relativamente à variabilidade e dinâmica da zona correspondente à praia submersa, os dados existentes são ainda escassos, existindo grande lacuna de conhecimento para a generalidade da área em estudo. Ferreira (1993), tendo por base um levantamento batimétrico detalhado, realizado pelo Instituto Hidrográfico entre Maio e Setembro de 1987, caracterizou pela primeira vez a morfologia da praia submersa na região. A existência de um segundo levantamento, em alguns pontos da área analisada, realizado em Dezembro de 1990 (pelo Instituto Hidrográfico e pelo Grupo DISEPLA), permitiu obter alguma comparação evolutiva, ainda que deficiente. Teixeira (1994) procedeu à análise de uma área restrita mas com um número elevado de levantamentos batimétricos, permitindo um melhor acompanhamento temporal da evolução da zona de praia submersa. O local estudado (S. Jacinto) localiza-se imediatamente a norte da zona de estudo e corresponde à área de influência do molhe norte do porto de Aveiro.

Para qualquer dos autores, a forma mais importante e que condiciona de maneira decisiva a morfologia da praia submersa, é a barra externa submersa, correspondente a uma importante acumulação sedimentar, alongada, sub-paralela à praia e com elevada variação de comportamento. Por vezes, registou-se ainda a ocorrência de uma barra interna, de reduzidas dimensões, próxima da praia emersa, que deverá existir apenas temporariamente e em condições particulares, nomeadamente após situações de erosão da praia emersa (Ferreira, 1993).

Teixeira (1994), tendo por base os dados de 30 levantamentos topo-hidrográficos da Praia de S. Jacinto, obtidos após 1950, distingue três tipos de morfologias, de acordo com o comportamento da barra submersa:

I - Barra submarina paralela contínua, onde ocorre barra permanente em longa extensão, sub-paralela à linha de costa;

II - Barra submarina paralela e descontínua, semelhante à anterior mas com a barra recortada por vales, possivelmente associados ao escoamento de correntes de retorno ("rip currents");

III - Barra transversal, com alinhamento oblíquo ao litoral, estando as barras soldadas à praia emersa. Resulta da migração das barras paralelas para a face da praia.

O autor refere que o tipo mais comum é intermédio entre os comportamentos II e III, ocorrendo barras em crescente.

Ferreira (1993), tendo por base o levantamento de 1987, tinha já proposto a classificação do perfil transversal em dois tipos distintos (figura 3.2.), de acordo com a variabilidade da barra submersa:

Perfil de barra externa, onde a barra se encontra bem expressa, destacada da praia e com cava notória;

Perfil de "corredor", que corresponde, de forma genérica, a uma redistribuição da barra pelo perfil, podendo ser atribuível à deslocação da barra para terra.

No levantamento de 1987 há alternância sistemática destes dois tipos de perfis, dando um aspecto global em tudo semelhante ao tipo III de Teixeira (1994).

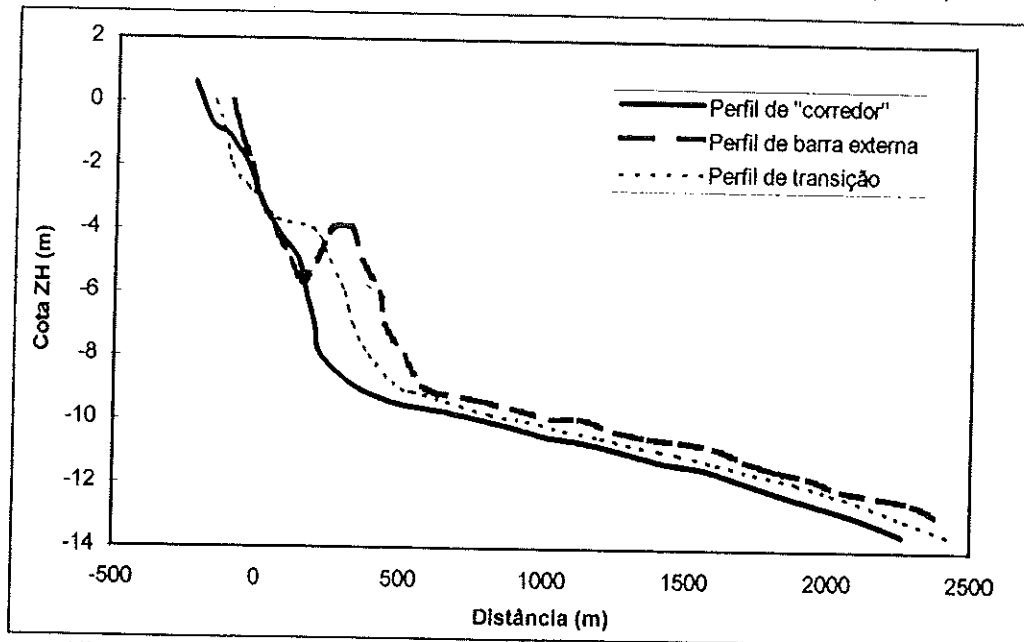


Figura 3.2. Exemplos de perfis de barra externa, de transição e de "corredor".

No que respeita à variação da morfologia das barras ao longo da área em estudo, Ferreira (1993) regista uma maior continuidade e desenvolvimento da barra externa na parte a sul de Praia de Mira do que a norte desta povoação. No sector meridional, a altura e a largura da barra são consideravelmente maiores, com valores

máximos de 5 m e de 600 m, respectivamente. A norte da Praia de Mira, a altura da barra não atinge mais do que os 3 m e a largura raramente excede os 400 m, registando-se a ocorrência de áreas onde a barra é incipiente, tendo dimensões muito reduzidas. A profundidade de enraizamento das barras é genericamente inferior na parte norte (-2 m ZH a -5 m ZH) do que na parte sul (-4 m ZH a -8 m ZH). O autor sugere a possibilidade das barras se encontrarem em fase de degradação, no sector norte, indicando deficiência sedimentar.

Relativamente à variabilidade da barra submersa na transversal à praia, Teixeira (1994) refere a existência de uma permanente oscilação da sua posição, possuindo uma profundidade de instalação entre -1.5 m ZH e -6.5 m ZH, para a Praia de S. Jacinto, com a máxima profundidade a ser registada após a ocorrência de um temporal. O autor considera que o limite máximo de formação da barra não deverá ultrapassar a batimétrica dos -10 m ZH. De acordo com os dados de Ferreira (1993) observa-se que o máximo valor de enraizamento da barra submersa, na área entre Aveiro e o Cabo Mondego, para os levantamentos de 1987 e de 1990, foi pouco superior à batimétrica dos -8 m ZH.

No que respeita à deslocação da barra na direcção da praia emersa, Teixeira (1994) refere que a migração total da barra submersa para a praia é muito rara, dado a existência de grande irregularidade temporal da potência da ondulação na região. Parece igualmente improvável a completa deslocação da totalidade da massa arenosa contida na barra para a praia emersa, visto que o volume contido na barra é, em norma, bastante superior (2 a 3 vezes) ao volume médio da própria praia emersa. Assim, é de supor a existência de um limite de enraizamento mínimo, a partir do qual poderá haver geração de perfis do tipo "corredor", com possibilidade de alguma transferência sedimentar para a praia, mas não total, não se processando a transição barra-berma convencional. A transferência sedimentar e morfológica do tipo barra-berma estará, então, associada à existência, ou não, de barra submersa interna, ocasional e enraizada a pequena profundidade (-0.5 m ZH a -3 m ZH). A variabilidade associada a esta pequena barra é ainda menos conhecida e raramente citada pelos autores, dada a sua localização (na zona de rebentação permanente) dificultar o seu correcto levantamento batimétrico (Ferreira, 1993).

### 3.2.5. Alterações morfológicas induzidas por ocupação da faixa litoral

O troço costeiro Aveiro - Cabo Mondego corresponde à metade sul de um sector natural mais vasto (Espinho - Cabo Mondego), interrompido artificialmente por obras de engenharia costeira associadas a uma estrutura portuária (porto de Aveiro). A sul da barra de Aveiro o litoral sofre o impacte directo da retenção de areias no molhe norte da barra, tendo apresentado erosão acentuada nas últimas décadas. Para fazer face aos recuos sentidos construíram-se várias obras de defesa costeira, responsáveis pela artificialização aí evidente. A zona de Costa Nova do Prado, onde se registaram as mais elevadas taxas de recuo da linha de costa, está actualmente protegida por extenso e contínuo campo de esporões e enrocamento longilitoral, sendo a praia praticamente inexistente. As estruturas aí existentes possuem, frequentemente, rupturas e destruições, obrigando a obras de beneficiação.

A sul do final do enrocamento longilitoral de Costa Nova do Prado existe pronunciada reentrância, com indícios evidentes de galgamentos oceânicos. Quando estes não ocorrem desenvolve-se arriba talhada na duna, actualmente de cotas relativamente baixas. Mais a sul, na povoação de Vagueira, construíram-se estruturas de protecção, constando de dois esporões e um enrocamento longilitoral. Este, tem sido frequentemente modificado e fortalecido, por forma a obstar à destruição de que é alvo pelo mar. As edificações existentes na zona marginal situam-se a cotas baixas, afectáveis pelo mar, caso não existisse protecção frontal. A sul de Vagueira registam-se áreas de galgamento, tendo algumas delas sido realimentadas artificialmente, com vista à reconstrução do cordão dunar frontal. Para sul do esporão mais meridional ocorrem arribas talhadas na duna, cujo comando vai aumentando até à Praia do Areão.

Na Praia do Areão a ocupação permanente resume-se a alguns apoios de pesca e ao parque de estacionamento, sobre a depressão interna à duna. A cota da crista dunar (topo da arriba) é elevada, ainda que, actualmente, seja inferior à máxima existente há alguns anos atrás, visto que a crista do cordão dunar original foi já erodida.

Para sul, a arriba na duna vai diminuindo de importância, até deixar de existir em Barra de Mira. A faixa arenosa torna-se genericamente mais larga do que nas praias até agora descritas, atingindo a sua máxima largura em Praia de Mira. Nesta localidade existe ocupação urbana intensa, protegida da acção do mar pelo efeito de dois

esporões, que têm induzido agravamento de erosão a sotamar. No entanto, a arriba talhada na duna imediatamente a sul do esporão meridional de Praia de Mira diminui rapidamente de importância, transitando para uma situação de duna estável, a sul.

Em Canto do Marco (Palheirão) e a sul deste local, a praia mantém-se genericamente larga, com alta praia bem definida e, por vezes, com formação de antedunas. A linha de costa tem-se mantido estável nas últimas décadas e não são geralmente evidentes efeitos directos da acção do mar nas dunas. Existem, nesta área, duas localidades (Palheiros da Tocha e Praia de Quiaios), que não registam problemas de erosão, não exibindo estruturas de defesa costeira.

No extremo sul da área de estudo localiza-se o Cabo Mondego, promontório natural composto por calcários margosos jurássicos, apresentando arribas vivas e escarpadas. Esta saliência natural constitui obstáculo directo à progressão para sul das areias transportadas pela deriva litoral, sendo responsável pelo carácter rectilíneo da costa situada imediatamente a norte e pela inexistência de recuo.

### 3.3. SEDIMENTOLOGIA

Existem vários trabalhos publicados sobre a caracterização granulométrica das praias englobadas na área de estudo, cujos resultados serão apresentados de forma comparativa e integrada.

Os trabalhos de Pureza e Araújo (1956a,b) foram os primeiros, incidindo apenas em amostras compostas colhidas nas zonas de maré alta e de maré baixa. Para a área entre Aveiro e o Cabo Mondego os autores analisaram cinco praias (Quiaios, Palheiros da Tocha, Canto do Marco, Praia de Mira e Costa Nova). Os resultados granulométricos apresentados não são concordantes nos dois trabalhos publicados, apesar de se referirem às mesmas amostras, pelo que se decidiu pela utilização apenas dos valores do último trabalho, onde presumivelmente terá ocorrido a possibilidade de correcção de valores inicialmente incorrectos.

Hidrotécnica Portuguesa (1980 *in* Teixeira, 1994), realizou um estudo granulométrico com base numa campanha do Inverno de 1979, onde foram colhidas 42 amostras da face da praia entre Espinho e o Cabo Mondego.

Ferreira (1993) fez a caracterização granulométrica da zona entre-marés e da praia submersa, até aos -12 m ZH, entre Aveiro e o Cabo Mondego, usando um total

de 37 amostras, recolhidas em Dezembro de 1990 ao longo de sete perfis (Costinha, Palheiros da Tocha, Canto do Marco, Praia de Mira S, Praia de Mira N, Praia do Areão e Vagueira).

Pinto (1993) recolheu sedimentos da face da praia (9 amostras), da berma (10 amostras) e do cordão dunar frontal (20 amostras) entre Vagueira e Praia de Mira, com espaçamentos variados, tendo caracterizado a variação dos parâmetros granulométricos nesse troço costeiro.

Teixeira (1994) e Tomás (1995), promoveram uma campanha conjunta no Verão de 1991, onde recolheram amostras entre Espinho e o Cabo Mondego, a cada dois quilómetros, na zona da duna, da berma e da face da praia, as quais são analisadas com maior detalhe no trabalho de Tomás (1995).

Boto (1997) recolheu e analisou 78 amostras da zona entre-marés, obtidas entre 17/6/96 e 26/3/97, apenas para o sector costeiro entre Costa Nova e Areão.

No âmbito do presente estudo, procedeu-se à recolha de 41 amostras da duna, da alta praia, da berma, de sistemas lomba-canal e da face da praia, em nove locais: Praia de Quiaios, Costinha, Palheiros da Tocha, Canto do Marco, Praia de Mira S, Praia de Mira N, Praia do Areão, Vagueira E e Vagueira N. Foram determinados os parâmetros granulométricos, e comparados os resultados com os dos restantes autores. A recolha teve lugar em Setembro de 1992 (campanha MOLICEIRO 1/92). As amostras de alta praia e de sistemas lomba-canal não foram usadas na comparação com os dados de outros autores, pelo que se aproveitaram 28 das 41 amostras disponíveis.

### 3.3.1. Cordão dunar frontal

Tomás (1995) apresenta uma caracterização das areias do cordão dunar entre Espinho e o Cabo Mondego, baseada em amostragem do Verão de 1991, onde foi recolhida uma amostra da camada superficial das areias da face dunar voltada ao mar. De acordo com este estudo, a classe modal dominante é a classe 1-1.5  $\phi$ , com 78% das ocorrências. A média dos diâmetros médios obtidos no sector sul (Vagueira - Cabo Mondego) é de 1.22  $\phi$  (0.43 mm), evidenciando uma capacidade de selecção textural através do transporte eólico, relativamente aos valores observados para a face da praia e berma. Os valores máximo e mínimo obtidos para este sector foram 0.9  $\phi$  e 1.57  $\phi$ . O

autor considera que o diâmetro médio se torna progressivamente mais grosseiro para sul, ainda que não exista uma tendência acentuada e que a variabilidade entre pontos consecutivos seja muito superior a essa tendência.

Pinto (1993) refere que o diâmetro médio das areias do cordão dunar entre Praia de Mira e Vagueira varia entre  $0.98 \phi$  e  $1.7 \phi$ , correspondendo maioritariamente a areias médias, bem calibradas a muito bem calibradas. A quase totalidade das amostras observadas por Tomás (1995) possuem distribuições aproximadamente simétricas (82.9%) e mesocúrticas (95.1%).

No presente trabalho, procedeu-se à análise de amostras de duna em sete locais, não sendo recolhidas amostras em Vagueira N e em Vagueira S por inexistência de cordão dunar, substituído por enrocamento e por um aterro, respectivamente. Os resultados obtidos foram globalmente semelhantes aos de Tomás (1995), como se observa na figura 3.3. Registou-se uma variabilidade na média granulométrica entre  $0.89 \phi$  e  $1.41 \phi$ , com um valor médio de  $1.14 \phi$  (0.45 mm). As amostras apresentaram, de forma geral, populações bem calibradas e aproximadamente simétricas.

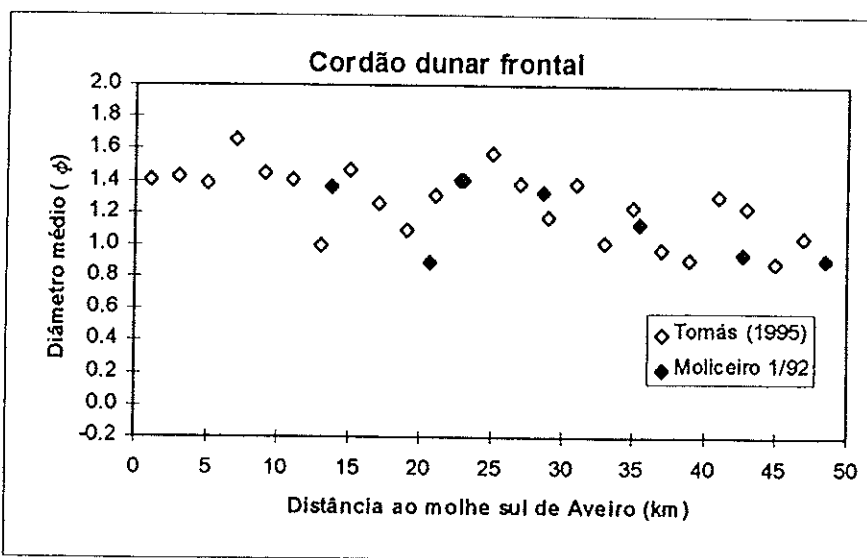


Figura 3.3. Comparação da distribuição espacial da média granulométrica das amostras colhidas no cordão dunar frontal.

### 3.3.2. Praia emersa

#### 3.3.2.1. Berma

Tomás (1995) caracteriza as areias da berma (colhidas a meia largura da berma) como sendo dominadas pela classe modal 1-1.5  $\phi$ , com 65.1% das ocorrências,

entre Espinho e o Cabo Mondego. A média global para a área entre Vagueira e o Cabo Mondego é de  $1.0 \phi$  ( $0.5 \text{ mm}$ ), com uma variação total entre  $1.46 \phi$  e  $-0.13 \phi$ . O autor considera que o diâmetro médio aumenta para sul, ainda que de forma marcadamente irregular. De maneira geral, às amostras da berma correspondem areias bem calibradas, com perfil aproximadamente simétrico.

Pinto (1993), para o troço Praia de Mira - Vagueira, refere que as areias são geralmente grosseiras a médias, com diâmetro médio compreendido entre  $0.9 \phi$  e  $1.5 \phi$ , sendo bem a moderadamente calibradas e simétricas.

No trabalho realizado no âmbito desta dissertação colheram-se amostras a meio da berma, em nove locais. As médias granulométricas obtidas variaram entre  $1.53 \phi$  e  $0.67 \phi$ , com uma média absoluta de  $1.03 \phi$  ( $0.49 \text{ mm}$ ), sendo as amostras aproximadamente simétricas e bem a moderadamente calibradas. Mais uma vez se verificou uma boa aproximação entre estes valores e os de Tomás (1995) (figura 3.4).

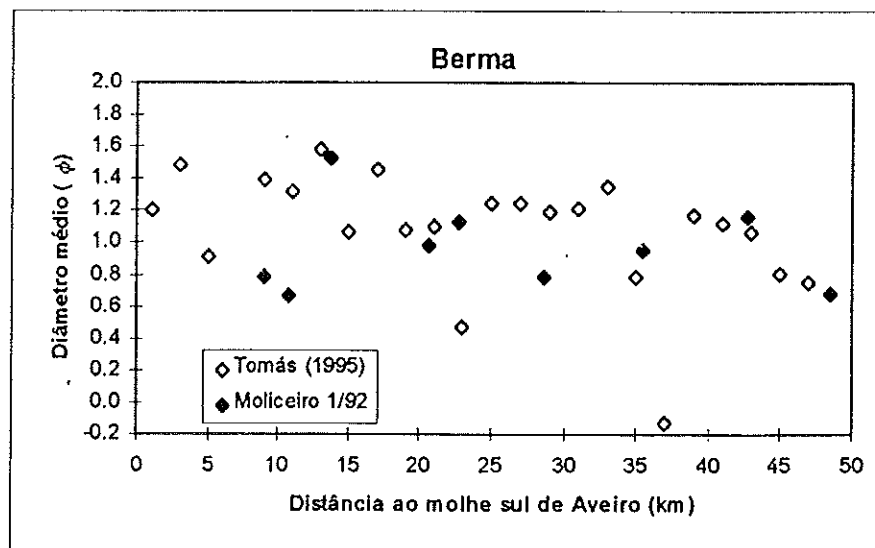


Figura 3.4. Comparação da distribuição espacial da média granulométrica das amostras colhidas na berma.

### 3.3.2.2. Face da praia

A primeira caracterização da granulometria da face da praia, na área em estudo, foi efectuada por Pureza e Araújo (1956a,b), com amostras de cinco praias entre Aveiro e o Cabo Mondego. Para cada praia foi calculada a média dos dois conjuntos de amostras colhidos na zona entre-marés (maré alta e maré baixa). Os diâmetros médios obtidos variaram entre  $0.43 \phi$  e  $0.7 \phi$ , com uma média de  $0.58 \phi$  ( $0.67 \text{ mm}$ ).

No trabalho de Hidrotécnica Portuguesa (1980 *in* Teixeira, 1994), resultante de

uma campanha realizada no Inverno de 1979, o diâmetro médio do total de 42 amostras colhidas entre Espinho e o Cabo Mondego foi de  $0.634 \phi$  (0.64 mm). Para a área a sul de Aveiro os valores da média granulométrica variaram entre aproximadamente  $-0.4 \phi$  e  $0.95 \phi$ , sendo a média de  $0.5 \phi$  (0.71 mm). O conjunto de dados apresentado por Teixeira (1994), para as praias de Vagueira, Praia de Mira, Palheiros da Tocha e Praia de Quaios permite calcular um valor do diâmetro médio para a área de 0.55 mm, com oscilações entre 0.42 mm e 0.62 mm.

Ferreira (1993) analisa sete amostras de praias entre Costinha e Vagueira, variando o diâmetro médio entre  $0.38 \phi$  e  $1.17 \phi$ , para um valor médio de  $0.86 \phi$  (0.55 mm). Essas amostras são, no global, moderadamente a mal calibradas, possuindo assimetria ligeiramente negativa.

Pinto (1993) refere que a face da praia contém geralmente areias muito grosseiras a grosseiras, entre Praia de Mira e Vagueira, variando o diâmetro médio entre  $-0.21 \phi$  e  $1.07 \phi$ . As populações analisadas pelo autor eram bem a moderadamente calibradas e aproximadamente simétricas.

Para Tomás (1995) as areias da face da praia na zona em estudo são geralmente médias a grosseiras, com classe modal  $1-1.5 \phi$ , idêntica à que ocorre para areias da berma e da duna. Os diâmetros médios variaram entre  $0.03 \phi$  e  $1.57 \phi$ , sendo a média de aproximadamente  $1 \phi$  (0.5 mm), igual à que ocorre para areias da berma. Este facto leva Tomás (1995) a considerar que existe uma tendência para a indiferenciação textural nos domínios berma e face da praia. Contrariamente ao que o autor afirma (por erro de escrita, posteriormente corrigido nas conclusões), regista-se uma tendência para aumento do diâmetro médio de norte para sul, ainda que com uma grande variabilidade entre amostras consecutivas. Pinto (1993) afirma precisamente o contrário, para o sector costeiro estudado pelo autor. Às amostras da face da praia estudadas por Tomás (1995) correspondem populações bem a muito bem calibradas, aproximadamente simétricas e maioritariamente mesocúrticas.

Teixeira (1994) atribui as diferenças de comportamento entre as campanhas de 1979 (areias mais grosseiras, pior calibradas e com assimetria mais negativa) e de 1991, ao facto de estas terem ocorrido em épocas do ano distintas.

As amostras colhidas em Setembro de 1992, no âmbito do presente trabalho, mostram variação da média granulométrica entre  $1.64 \phi$  e  $0.89 \phi$  (figura 3.5), com uma

média para o total das amostras de  $1.05 \phi$  (0.48 mm), muito semelhante à obtida por Tomás (1995), aliás como na generalidade das observações anteriores.

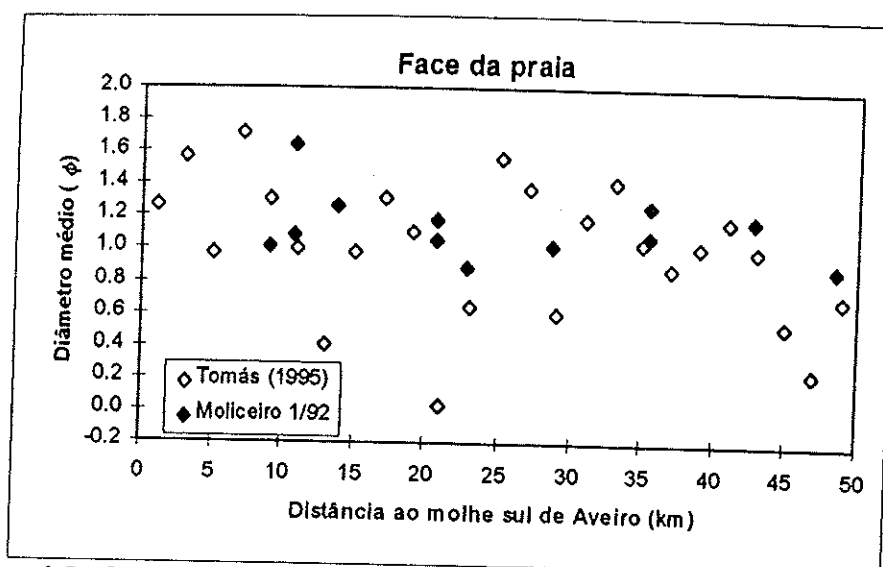


Figura 3.5. Comparação da distribuição espacial da média granulométrica das amostras colhidas na face da praia.

A análise efectuada por Boto (1997) permitiu classificar as areias da zona entre-marés de Costa Nova a Areão como sendo genericamente areias médias, moderadamente calibradas e de assimetria predominantemente negativa.

Por análise comparativa entre os vários autores e com base nos valores das amostras das campanhas de amostragem sistemáticas mais recentes, que englobaram toda a área de estudo (amostragens de Dezembro de 1990, Verão de 1991 e Setembro de 1992), foi calculado o valor da média granulométrica da face da praia para a globalidade da área em questão, obtendo-se um valor de 0.5 mm ( $1.0 \phi$ ), ainda que possam ocorrer variações muito acentuadas, quer de praia para praia, quer na mesma praia para diferentes épocas de amostragem.

Como conclusão, após análise conjunta dos domínios amostrados (face da praia, berma e duna), Tomás (1995) considera não haver contraste significativo entre os vários domínios, em termos texturais, devido ao reduzido espectro granulométrico disponível e à herança das características texturais da área fonte. Considera, ainda, que a variação das características texturais entre pontos de amostragem sucessivos é mais significativa do que a média registada entre os extremos do trecho litoral analisado (Espinho - Cabo Mondego). Estas conclusões são concordantes com os resultados obtidos neste trabalho, pela análise dos dados da campanha de Setembro de 1992. Face às variações observadas e à relativa robustez do valor da média, este parâmetro deverá

ser encarado como o mais apropriado a utilizar na caracterização geral da área.

### 3.3.3. Praia submersa

A única amostragem conhecida que tenha sido realizada com o intuito de caracterizar a zona de praia submersa foi a efectuada em Dezembro de 1990, pelo Instituto Hidrográfico e pelo Grupo DISEPLA. As amostras dessa campanha foram analisadas por Ferreira (1991, 1993).

As amostras colhidas apresentaram, na generalidade, comportamento unimodal com algumas excepções na zona entre-marés. O diâmetro médio mostrou uma rápida mas sequencial diminuição com o aumento da distância à linha de costa, passando de areias grosseiras a médias na face da praia (valores entre  $0.38 \phi$  e  $1.17 \phi$ ) para areias finas a muito finas aos -10/-12 m ZH ( $2.54 \phi$  a  $3 \phi$ ). Ferreira (1991) relacionou a variação do diâmetro médio das amostras com a distância à costa, estabelecendo a relação:

$$M_z = I - J \log B \quad (3.2)$$

em que  $M_z$  é a média granulométrica da amostra,  $B$  é o quociente estabelecido, em cada perfil, pela razão entre a distância da origem (cordão dunar) ao limite externo da barra e a distância da amostra a essa origem.  $I$  e  $J$  são valores empíricos que, para a média das amostradas estudadas, tomam os valores  $I = 2.48$  e  $J = 1.74$ . Desta forma, torna-se possível prever a evolução granulométrica para cada local, considerando a posição da barra como variável e dela dependendo a evolução granulométrica (figura 3.6). Esta equação não é aplicável à praia emersa, pois a média granulométrica não continua a aumentar em direcção a terra. Como tal, o seu limite interno de aplicação será a linha de maré baixa viva.

Como reflexo de variações nas condições hidrodinâmicas, será de esperar que para regimes mais energéticos a barra esteja mais distante da linha de costa (Ferreira, 1993; Teixeira, 1994), o que deverá ser acompanhado por um aumento nos grosseiros até distâncias mais afastadas da praia emersa. Pelo contrário, em condições de calma, e desde que haja tempo de resposta suficiente, a barra tenderá a deslocar-se para a costa,

diminuindo a área de cava, ao que corresponderá uma evolução granulométrica concordante, isto é, uma mais rápida transição desde materiais mais grosseiros, junto à face da praia, para as areias finas, no raso submarino.

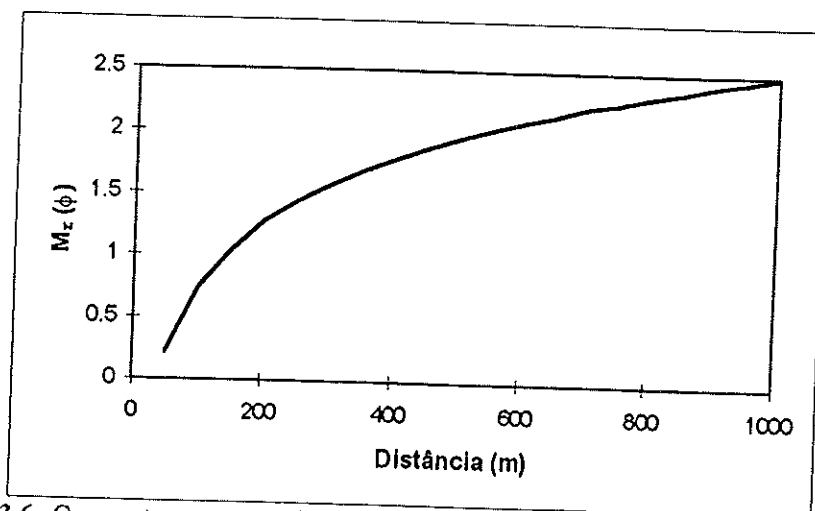


Figura 3.6. Comportamento previsto da média granulométrica com o afastamento à costa, para um perfil com limite de barra externa a 1000 m da origem (crista dunar).

As amostras da praia submersa são, em geral, moderadamente a bem calibradas, com assimetria negativa. A média granulométrica das amostras da barra interna foi de  $1.3 \phi$  (0.4 mm), diminuindo para  $1.7 \phi$  (0.3 mm) na barra externa. A profundidades entre os -10/-12 m ZH e os -25/-30 m ZH, a média permanece relativamente constante, entre  $2.7 \phi$  e  $2.9 \phi$  (areias finas a muito finas) (Ferreira, 1993). A profundidades superiores os sedimentos tornam-se mais grosseiros, transitando de depósitos litorais para depósitos da plataforma média (Dias, 1987).

### 3.4. EVOLUÇÃO RECENTE DA LINHA DE COSTA

O troço costeiro em questão é parte da barreira litoral que separa a laguna de Aveiro do Oceano Atlântico. A geração e evolução dessa barreira, cuja formação se iniciou no início do século X e terminou já no século XIX, tem sido descrita por vários autores, de entre os quais se destacam Girão (1941), Martins (1946) e Abecasis (1955). Recentemente, Teixeira (1994) voltou a reunir dados relativos ao posicionamento da barra que promove a abertura da laguna ao mar, recriando a sua evolução nas últimas centenas de anos.

A abordagem do presente trabalho incidirá unicamente nas publicações que se referem à evolução da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego no decorrer do presente século e, em particular, nas últimas décadas. Dos trabalhos que abordam este

tema, ao longo da área de trabalho, destacam-se os de Hidrotécnica Portuguesa (1980 *in* Teixeira, 1994), Ângelo (1991), Ferreira e Dias (1991, 1992), Bettencourt e Ângelo (1992), Ferreira (1993) e Teixeira (1994). Raros são os trabalhos em que os métodos utilizados são iguais, havendo recurso a diferentes bases de trabalho (mapas, fotografias aéreas, levantamentos de campo, etc.), a diferentes linhas de referência (nível médio do mar, contacto praia/duna, limite de maré alta, etc.) e a diferentes espaçamentos entre perfis analisados. Apesar destas diferenças, os valores são comparáveis entre si, residindo a maior dificuldade dessa comparação na ligação dos diferentes sectores e dos diferentes períodos utilizados por cada autor.

A tabela 3.8. sintetiza os dados obtidos por distintos autores, de acordo com os períodos e os sectores analisados.

Tabela 3.8. Taxas de evolução recente da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego (m/ano). Nota: Valores negativos indicam recuo e positivos acreção.

Período	Aveiro	C.N. Pradós	Vagueira	P. Areão	P. Mira	C. Marco	P. Tocha	Costinha	P. Quiaios
<b>Hidrotécnica Portuguesa (1980, <i>in</i> Teixeira, 1994)</b>									
1947/58	-8.2		-0.4						
1958/73	-5.2		-2.9						
1973/78	-4.0		-2.4						
<b>Bettencourt e Ângelo (1992)</b>									
1900/58		-1.7							-3.2
1958/85		-2.2							-0.9
<b>Ferreira e Dias (1992); Ferreira (1993)</b>									
1947/58	-4.6	-1.5	-0.1		-0.1	+1.5			
1958/70*	-4.3	-6.3	-1.6	-1.3	-1.1	+1.0	+0.7		+0.8
1970*/80	-4.4	-3.8	-2.4	-1.4	-1.0	+0.5	+1.2		+0.3
1980/90	+4.5	-3.7	-3.9	-1.8	-1.2	+0.2	0.0		+0.1
<b>Teixeira (1994)</b>									
1870/47	0.0		+0.4				+0.8		
1947/73	-4.0		-0.2				+0.7		
1973/89	-0.3								

\* Para o sector C. Marco - P. Quiaios a fotografia de 1970 foi substituída pela de 1973

Apesar de alguma dificuldade na interpretação global da tabela, devido aos factores já mencionados, existem pontos concordantes na análise de todos os autores. O principal é a tendência para o recuo de grande parte da linha de costa em estudo, que se faz sentir de forma particularmente significativa na parte norte do troço costeiro Aveiro - Cabo Mondego. A causa imediata mais apontada é a construção dos molhes do porto de Aveiro, no final da década de 40 (Oliveira *et al.*, 1982; Bettencourt e Ângelo, 1992; Ferreira e Dias, 1992; Ferreira, 1993; Teixeira, 1994), ainda que

existam registos de episódios erosivos anteriores. É igualmente consensual que a erosão costeira tem alastrado para sul, nas últimas décadas, abrangendo uma área cada vez mais vasta do litoral em questão. De acordo com os resultados baseados no período de análise mais recente (1980/90), apenas o litoral entre Canto do Marco e o Cabo Mondego se mantém estável ou com pequena tendência para acreção que, de acordo com Ferreira e Dias (1992) e Ferreira (1993) poderá terminar brevemente, dando lugar a uma situação erosiva.

Analisando os dados de Ferreira e Dias (1992), Ferreira (1993) e de Teixeira (1994), é possível concluir que a taxa de migração da linha de costa se tem vindo a acentuar, para o troço costeiro em análise, desde meados do século até à actualidade. Pela observação da figura 3.7, cujos dados foram compilados por Teixeira (1994), pela análise e conjugação dos trabalhos de Hidrotécnica Portuguesa, de Ferreira e de Teixeira, regista-se que de valores globais de acreção (+0.5 m/ano), no início da década de 50, se passou para uma situação de recuo médio próximo de 1.4 m/ano, para a globalidade do troço costeiro, no final da década de 80. Este valor é próximo da taxa de recuo médio (1.1 m/ano) apontada por Ferreira (1993), para o período 1980/90. Este tipo de comportamento denota uma crescente deficiência sedimentar para a região em questão, que tende a ser superada pela erosão de praias e dunas.

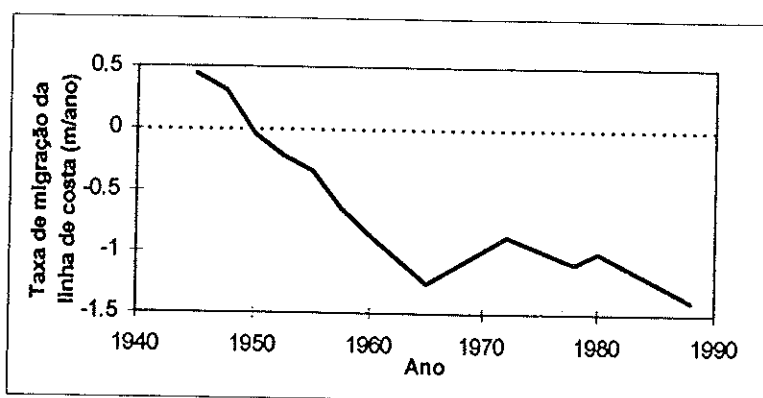


Figura 3.7. Evolução temporal da taxa média de migração da linha de costa, para a totalidade do troço Barra - Cabo Mondego (adaptado de Teixeira, 1994). Os valores negativos indicam erosão e os positivos acreção.

Tendo por base as tendências evolutivas apontadas, Ferreira e Dias (1992) e Ferreira (1993), fizeram um exercício de previsão de comportamento da linha de costa para as próximas décadas, tentando saber quando ocorreria a ablação completa do cordão dunar frontal, ao longo da área em estudo. Essas previsões apontam para que até ao ano 2010 ocorra a completa erosão do referido cordão em alguns dos sectores

analisados pelos autores, nomeadamente, entre Aveiro e Praia do Areão. É de registar que, nesta área, imediatamente a sul da Vagueira, já se introduziu um segundo esporão e se procedeu à realimentação dunar, por forma a evitar a ocorrência de galgamentos e a demolição do cordão dunar frontal, tal como previsto nos referidos trabalhos.

A tendência para o aumento dos valores de erosão, apontada por Ferreira e Dias (1992) e Ferreira (1993), e verificada por Teixeira (1994), só deverá cessar quando a totalidade da deriva litoral for alimentada a partir da erosão de praias e dunas, obtendo-se então taxas médias de recuo relativamente constantes. Poderá, ainda, resultar de uma reposição do fornecimento sedimentar, por acção antrópica (realimentação artificial, reconstrução dunar, etc.) ou por acções naturais (e.g. reactivação do delta de vazante como fonte sedimentar importante, prevista por Teixeira, 1994). Este autor alerta ainda para que, caso continue a erosão do cordão dunar como forma de restituição sedimentar, as reservas sedimentares deste corpo se esgotarão em meados do próximo século, sendo provável que as taxas de recuo sofram um incremento, dado o decréscimo de cotas para o interior.



*A onda vem, cresce e, antes de se despedaçar em espuma, o Sol veste-a de uma armadura de aço a reluzir. Há-as de um esverdeado de alga morta, há-as que recuam e se enovelam noutras ondas prestes a desabar. Mas há umas, esplêndidas, que vi em Mira, ao pôr do Sol, quando o vasto areal fica todo ensanguentado. A onda forma-se e corre por aquela magnífica estrada que vem do Sol até à praia, ganha primeiro reflexos doirados na crista e depois, quando se estira pelo areal molhado, fica cor do vinho nos lagares.*

*Raul Brandão (Os Pescadores)*

## PARTE II

### Transformação da agitação incidente



## 4. TRANSFORMAÇÃO DA ALTURA DA ONDA INCIDENTE SOBRE BARRAS SUBMERSAS

### 4.1. INTRODUÇÃO E CONCEITOS TEÓRICOS

As ondas geradas pelo vento funcionam como agentes transportadores de energia, obtendo directamente a sua energia do próprio vento, propagando-a ao longo do oceano e transferindo-a para a zona costeira (Komar, 1983). Na aproximação das ondas à costa e, sobretudo, na fase de transmissão da energia para a zona costeira, ocorrem vários processos graduais de transformação, que terminam na rebentação. Entre eles destacam-se a refacção, a difracção e as consequentes variações na altura da onda, dependentes quer das características da ondulação incidente, quer das características do fundo sobre o qual se propagam. Estes processos de transformação podem ainda ser afectados pela interacção com correntes e com diferentes grupos de ondas. Como consequência de todas estas acções, para além da transformação das características da onda, ocorrem ainda variações locais do nível do mar, com abaixamento ("setdown") e elevação ("setup") ao longo do percurso percorrido pela ondulação incidente.

De forma genérica, antes da rebentação ocorre dissipação de energia da onda por atrito com o fundo, e uma diminuição da velocidade da onda incidente. Com a aproximação ao local de rebentação verifica-se um rápido aumento da altura da onda, até atingir o máximo na posição de rebentação. Este processo foi descrito por Balsillie (1983a) como "alpha wave peaking" (empolamento da onda), sendo sobretudo dependente do pendor do fundo e da declividade da onda. A rebentação processa-se por instabilidade da crista da onda, devido a um excesso de velocidade e de volume de água na parte superior, relativamente ao restante corpo da onda.

Balsillie (1983b) estima que, no momento da rebentação, aproximadamente 84% do volume da onda se situa acima do nível estático da água. A existência de um conjunto de ondas com diferentes alturas, dentro do mesmo trem de ondas, obriga a que para ondas irregulares o local de rebentação não possa ser considerado como único, devendo-se falar em zona de rebentação, cuja largura é dependente do pendor da praia e do domínio de alturas existente num trem de ondas (Komar, 1983). No entanto, é possível definir uma linha de rebentação média, correspondente à posição

média onde as várias ondas iniciam o processo de rebentação, ainda que tal linha seja de difícil determinação prática (Jacob, 1994).

Após o processo de rebentação, verifica-se uma elevada taxa de dissipação de energia sobre a face da praia, caso a rebentação aí actue directamente, ou ao longo da zona de "surf" (zona de espalho), caso ocorra propagação da ondulação durante o processo de rebentação. Desta dissipação de energia resulta a total anulação da onda (quando a rebentação é sobre a face da praia) ou uma atenuação importante da sua altura.

Em costas com sistemas de barra-cava, o aumento da profundidade junto à zona de cava pode ser suficiente para impedir a total dissipação de energia na zona de "surf" inicial, permitindo a reformação de ondas com menor altura, que se propagam na zona de depressão, sofrendo novo processo de empolamento e nova rebentação sobre uma barra consecutiva ou directamente sobre a face da praia. Este processo pode repetir-se por várias vezes, no caso de zonas de praia submersa com barras múltiplas, tendo como consequência imediata uma redução importante da energia das ondas que atingem a praia emersa. Esta energia residual é por sua vez transmitida para a praia emersa através da própria rebentação da onda e ainda pela existência de "swash" (espraio) e "backwash" (ressaca). Dependendo da forma como esta energia é transmitida à praia pode ocorrer erosão ou deposição sedimentar.

Em praias emersas com declive elevado ocorrem ainda processos de transferência directa da energia da onda em direcção ao mar, através de ondas reflectidas que vão interferir com o trem de ondas incidentes.

A complexidade dos mecanismos que levam à transformação da onda sobre obstáculos submersos é elevada, tendo sido objecto de observação por vários investigadores (Mallayachari e Sundar, 1996). Não é intenção deste trabalho a reprodução exhaustiva de tais mecanismos. No entanto, dada a sua grande importância para um melhor conhecimento do papel das barras submersas na morfodinâmica da praia e na interacção praia emersa/praias submersas, esses processos serão analisados de uma forma empírica e simples.

Em capítulos seguintes serão avaliadas a dissipação de energia das ondas incidentes e as variações dos níveis máximos de actuação das ondas reformadas sobre a praia emersa.

## 4.2. ESTUDOS PRÉVIOS

São inúmeros os trabalhos existentes sobre transformação da altura de onda no processo de rebentação, tornando-se difícil a sua completa análise nesta síntese. Observou-se, contudo, a escassez de referências e utilização, na literatura analisada, de experiências de campo com medições efectivas dos parâmetros mais importantes para as relações que neste trabalho se pretendem estabelecer. Pelo contrário, registou-se uma proliferação de modelos numéricos teóricos nas últimas duas décadas, a maior parte dos quais sem testes de campo que permitam a sua validação. Tal facto é espelho das difíceis condições de obtenção de registos na rebentação, sobretudo em condições energéticas elevadas, bem como dos elevados custos associados à componente experimental prática.

Este resumo sobre estudos anteriores dará importância a trabalhos baseados em experiências de campo ou em testes laboratoriais que simulem praias com barras (fixas ou móveis) e, sobretudo, que tentem prever de forma empírica a relação entre a altura da onda reformada e a altura da onda incidente ou na rebentação inicial. Serão ainda referidos trabalhos sobre modelos que incluam calibração com dados experimentais.

Dada a já referida dificuldade de obtenção de dados sobre rebentação em barras, no campo, a maior parte dos trabalhos analisados correspondem a ensaios laboratoriais que incidem sobre vários tipos de estruturas e de perfis de praia, incluindo barreiras submersas (com secções quadradas, triangulares ou trapezoidais), perfis com degrau (bruscos ou graduais) e barras submersas de pequena escala (móveis ou fixas).

Por se pretender determinar a variação brusca na altura da onda, associada à sua passagem e rebentação sobre uma barra ou obstáculo submerso, não se analisaram em detalhe trabalhos relativos a previsões de decaimento gradual da onda ao longo da zona de "surf", em praias dissipativas sem barra. Algumas das principais formulações utilizadas para este tipo de previsão poderão ser consultadas em Battjes e Stive (1985), Battjes (1986), Carter (1988), Fredsøe e Deigaard (1992), Roelvink (1993), Jacob (1994) e Sunamura e Okazaki (1996), entre outros.

O primeiro estudo experimental sobre transformação de ondas em barras terá sido realizado por Stucky e Bonnard (1937, 1938 *in* Balsillie, 1984a), curiosamente para testar a acção de um quebra-mar submerso a construir próximo da cidade do Porto.

A primeira tentativa, baseada em dados laboratoriais, para calcular os efeitos de barreiras submersas na altura da onda incidente foi feita por Johnson *et al.* (1951 in Balsillie, 1984a), sugerindo os autores que:

$$H_r/H_i = (1 - h_{bc}/d)^{0.5} \quad (4.1)$$

onde  $H_r$  é a altura da onda reformada,  $H_i$  é a altura da onda imediatamente antes da primeira rebentação ( $= H_{b1}$ ),  $h_{bc}$  é a altura da barreira e  $d$  a profundidade da água medida no limite externo da barreira. Existem, no entanto, dificuldades na aplicação desta fórmula visto que, para condições de campo, é difícil a determinação correcta de  $h_{bc}$  e de  $d$ , em condições de rebentação sobre a estrutura, pelo que frequentemente se utilizam aproximações a estes valores. Por outro lado, quando  $h_{bc}/d = 1$ , a razão  $H_r/H_i$  seria obrigatoriamente nula, relação que se sabe não ser verdadeira (Balsillie, 1984a).

Vera-Cruz (1962) realizou uma série de ensaios laboratoriais com o objectivo de determinar a altura da onda reformada e as suas relações com as ondas incidentes, após a passagem sobre um obstáculo submerso. O primeiro dos ensaios, que levou ao desenvolvimento do estudo, foi efectuado num modelo de escala reduzida para o porto de Póvoa de Varzim, determinando o autor que a altura da onda na entrada deste porto era proporcional à altura ao largo ( $H_o$ ), quando  $H_o < 4$  m. Para valores de  $H_o$  superiores a 4 m, a altura da onda na entrada do porto passava a ser relativamente constante, não variando com  $H_o$ . Em ensaios de canal com dois tipos de obstáculos fixos, reproduzindo praias com sistema barra-cava, o autor registou igualmente que para valores de  $H_i$  elevados o valor de  $H_r$  foi relativamente constante e independente de  $H_i$ . Concluiu, ainda, que não existiu influência do período na reformação das ondas e que os factores de que esta depende são, sobretudo, a profundidade de água sobre a barra e o pendor da praia.

Em trabalhos de campo com ondas rebentando e propagando-se em recifes de coral, Suhayda e Roberts (1977) referem que a relação  $H_r/H_i$  pode ser dada por:

$$H_r/H_i = 1 - 0.8e^{(-0.6d_c/H_i)} \quad (4.2)$$

sendo  $d_c$  a profundidade de água sobre a crista da barreira.

Keady e Coleman (1980) investigaram o efeito de uma barreira submersa sobre um fundo horizontal na atenuação da altura de ondas com rebentação mergulhante (“plunging”). Os autores obtiveram a seguinte relação:

$$H_r/H_i = 0.58(H_i/d_c)^{-0.8} \quad (4.3)$$

que se torna irreal para valores de  $d_c = 0$ , isto é, quando a crista está ao nível da água (Balsillie, 1984a). Keady e Coleman (1980) estimaram ainda que a taxa  $H_r/H_i$  se situa, de acordo com os dados observados, entre 0.25 e 0.5.

Carter e Balsillie (1983) estudaram a atenuação da energia sobre barras, no campo, em locais da Florida (EUA) e da Irlanda do Norte. Assumindo que a energia da onda é directamente proporcional ao quadrado da altura da onda (teoria linear), estabeleceram que:

$$H_{br}/H_{bi} = 0.05 + 0.18\log(1 + C_{bi}/W_{bi}) \quad (4.4)$$

onde  $H_{bi}$  e  $H_{br}$  são, respectivamente, as alturas da onda na rebentação sobre a barra inicial e sobre uma barra secundária,  $W_{bi}$  é a largura da zona de rebentação e  $C_{bi}$  é a velocidade da onda na primeira rebentação. Os valores de  $C_{bi}$  e de  $W_{bi}$  são normalmente de difícil obtenção no campo, tendo que ser assumidos ou calculados a partir de uma teoria de onda, o que dificulta a aplicação desta fórmula. Os autores referem que a quase totalidade dos valores de  $H_r/H_i$  obtidos caem no intervalo 0.2 a 0.65, ou seja, correspondem a uma redução da altura da onda entre 35% e 80%.

Balsillie (1984a) efectuou um resumo dos estudos laboratoriais e de campo que tiveram como base a medição das características das ondas em rebentação sobre barras submersas, com vista à obtenção de formas empíricas de previsão da transformação da onda em zonas de praia submersa com sistemas de barra-cava. O autor, utilizando os dados de campo e de laboratório disponíveis na literatura, relacionou a razão  $H_r/H_b$  com o parâmetro equivalente da declividade da onda ( $D_{eb} = H_b/gT^2$ ), obtendo como melhor ajuste a equação:

$$H_r/H_b = 0.26e^{\tanh 1.75(D_{eb})} \quad (4.5)$$

O autor indica que a utilização de  $H_b$  é mais correcta do que o recurso a  $H_i$ , devido ao rápido processo de empolamento da onda junto à rebentação, pelo que os valores utilizados que estavam referidos a  $H_i$  foram recalculados para  $H_b$ , de acordo com a equação proposta por Balsillie (1983a):

$$H_b/H_i = 1 - 0.4 \ln[\tanh(100H_i/gT^2)] \quad (4.6)$$

Dally *et al.* (1985) desenvolveram um modelo com soluções analíticas para determinar a transformação da altura da onda sobre fundos arbitrários. Os autores testaram o modelo num perfil protótipo, em tanque de grandes dimensões, com dois sistemas de barra-cava, utilizando ondas na rebentação com valores próximos de 2 m. Concluíram que a aplicação do modelo às condições de teste foi razoável, em termos qualitativos, conseguindo reproduzir os efeitos de aproximação, rebentação e reformação da onda.

Battjes e Stive (1985) validaram e calibraram um modelo para determinar a taxa de dissipação de energia associada à rebentação de ondas irregulares, usando dados de laboratório e de campo, onde incluíram praias com barras. Apesar de não apresentarem resultados explícitos sobre a percentagem de dissipação de energia devida à rebentação sobre barras, foi possível estimar que, para o exemplo apresentado (caso 18), esta foi de cerca de 32% para a barra externa e de 47% para a barra interna.

Watanabe e Dibajnia (1988) apresentaram um modelo numérico teórico para previsão da deformação da onda devido à aproximação, empolamento e rebentação, incluindo a atenuação e recuperação da onda na zona de "surf". Os autores efectuaram testes laboratoriais de pequena escala para compararem o comportamento do modelo com as medições. Para praias do tipo barra-cava, utilizando ondas com 7 cm de altura e cerca de 1 s de período, o modelo reproduz bem a atenuação, a reformação e a rebentação secundária, ainda que a altura da onda perto da rebentação seja ligeiramente subestimada. Para o teste efectuado a razão  $H_r/H_b$  obtida foi de cerca de 0.6, com uma previsão do modelo de 0.63.

Kobayashi (1988) efectuou uma revisão dos trabalhos existentes sobre transformação da onda na zona de "surf", apenas de forma descritiva e unicamente

incidente em modelos, não apresentando quaisquer trabalhos de campo. No mesmo ano (Battjes, 1988) é apresentada uma s mula sobre a din mica de zonas de "surf" e de rebenta o, onde s o descritos os processos de empolamento, de rebenta o, propaga o e atenua o da onda. No entanto, poucas s o as refer ncias a praias com barras, apenas se citando trabalhos sobre modela o.

Aagaard (1989 *in* Short, 1992) estabeleceu uma equa o emp rica para a rela o entre a onda incidente e a onda reformada em barras, que pode ser descrita pela express o:

$$H_r = 0.67H_i + 0.048 \quad (4.7)$$

Esta equa o, determinada por regress o linear, prev  uma rela o directa ( $H_r \approx 0.67H_i$ ) entre a onda reformada e a onda na rebenta o, sobre barras submersas.

Roelvink (1993) desenvolveu um modelo que o autor considera ser distinto dos tipos param trico e probabil stico existentes, apelidando-o de modelo din mico. Na calibra o e valida o do modelo foram utilizados dados de laborat rio e de campo de praias com barra, concluindo-se que h  uma previs o qualitativa satisfat ria da rebenta o, ainda que ocorra uma subestima quantitativa.

Recentemente, Jacob (1994) desenvolveu um modelo em linha para determina o do perfil transversal de velocidade de correntes longilitorais na rebenta o, induzidas por ondas regulares ou aleat rias, englobando no modelo a transforma o da altura da onda durante as fase de empolamento e rebenta o, bem como a reforma o em zonas de depress o. O autor testou o modelo utilizando dados laboratoriais de trabalhos publicados, incluindo perfis com sistema de barra-cava. As ondas testadas possu am cerca de 10 cm de altura e 2 s de per odo. De acordo com os resultados, o modelo consegue reproduzir os principais comportamentos esperados na transforma o da altura da onda, sobrevalorizando essa altura na zona de rebenta o.

Kamphuis (1994) descreveu a transforma o da altura da onda atrav s da rebenta o admitindo um processo de aproxima o e empolamento ("shoalling") linear e usando um  nico c culo de atenua o da onda. O modelo   baseado em 170 testes com fundo m vel ou fixo, sendo que os de fundo m vel tinham pendor inicial uniforme de 1:10, que se transformava em perfil de barra no decurso do teste. Na verifica o do

modelo, relativamente a outros métodos (figura 4 em Kamphuis, 1994), verifica-se uma razão  $H_r/H_b = 0.4$  para o teste com perfil de barra-cava. Na comparação com dados de campo (figuras 7 e 8 de Kamphuis, 1994) em perfis com sistema barra-cava essa razão variou entre 0.4 e 0.8 para a previsão do modelo e entre 0.35 e 0.65 para as medições efectuadas. O autor considera que a aplicação do modelo a dados de campo mostrou diferenças surpreendentes entre distintos locais, sendo inconclusivo. Por esta razão, afirma haver necessidade de uma maior investigação com dados de campo. É curioso observar que os dados de campo usados por Kamphuis (1994) são respeitantes a trabalhos de outros autores, efectuados em 1980 e 1984.

Nesta síntese fica bem expresso que na última década o investimento em trabalho de campo nesta área foi deficitário, facto realçado por alguns dos autores citados, tendo ocorrido uma proliferação de modelos, sem o respectivo acompanhamento com calibração e validação no campo. Na generalidade dos casos, os modelos existentes baseiam-se em conceitos teóricos, sendo testados para situações geradas em laboratório, tais como a utilização de ondas monocromáticas, com alguns centímetros de altura e com períodos muito pequenos, não representativas das condições naturais.

#### 4.3. RESULTADOS (Campanha Tocha 92)

Durante a realização da experiência de campo Tocha 92 observou-se, frequentemente, a existência de rebentação em vários locais, originando um máximo de três linhas de rebentação bem definidas (barra interna, barra externa e face da praia). O número de linhas existente dependia, sobretudo, da maré e da altura da onda. A incidência de grupos de ondas irregulares, com diferentes alturas, obrigou a que ocorressem, por vezes, comportamentos intermédios das linhas de rebentação. Isto é, as ondas mais altas rebentavam na barra externa e/ou na barra interna, existindo algumas ondas (mais pequenas) que se propagavam sem rebentar, até atingirem a face da praia. Assim sendo, é necessário saber quando se considera que a rebentação de um trem de ondas terá sido efectiva, ou seja, quando uma percentagem suficiente das ondas rebentou sobre as barras por forma a alterar a altura média do grupo de ondas de forma substancial.

No campo, procedeu-se à separação dos trens de ondas em dois grupos, por observação visual, denominados de RS (trens de ondas com Rebentação Significativa) e de RI (trens de ondas com Rebentação Incompleta). Esta classificação foi aplicada às duas rebentações sobre barras, visto que sobre a face da praia ocorreu rebentação para todas as ondas. Na definição dos grupos utilizaram-se os seguintes critérios:

i) quando nenhuma das ondas dos trens observados rebentava sobre a 1ª ou 2ª linha de rebentação, estas foram classificadas como RI;

ii) quando todas as ondas dos trens observados rebentavam na 1ª ou na 2ª linha de rebentação, estas foram consideradas como RS;

iii) quando a maioria das ondas de um trem rebentava sobre a barra, estas foram consideradas RS.

Por vezes, a distinção entre grupos não foi fácil, visto existirem situações de transição.

Na tabela 4.1. encontram-se expressos todos os valores de  $\bar{H}_{b1}$ ,  $\bar{H}_{b2}$  e  $\bar{H}_{b3}$  (valores de alturas estimadas visualmente para a primeira, segunda e terceira linhas de rebentação), bem como as razões  $\bar{H}_{b2}/\bar{H}_{b1}$ ,  $\bar{H}_{b3}/\bar{H}_{b2}$  e  $\bar{H}_{b3}/\bar{H}_{b1}$ , estando assinalados os grupos (RS ou RI) a que cada altura pertence.

A razão  $\bar{H}_{b2}/\bar{H}_{b1}$  apresentou valores entre 0.29 e 0.53, para as ondas RS1, com uma média de 0.40. Para as ondas RI1 o intervalo da mesma razão cifrou-se entre 0.44 e 0.96, sendo o valor em geral maior para as ondas menores. Para a segunda rebentação, o valor de  $\bar{H}_{b2}$  crítico situou-se próximo de 1.4 m, ou seja, os grupos de ondas com altura média inferior a 1.4 m, na rebentação sobre a barra interna, podem ser considerados como pertencentes ao grupo RI2 (Rebentação Incompleta na 2ª linha). Apenas se registaram cinco observações deste tipo, variando os valores da razão  $\bar{H}_{b3}/\bar{H}_{b2}$  entre 0.50 e 0.72, para essas observações. Para as restantes medições, a mesma razão situou-se entre 0.33 e 0.56, com um valor médio de 0.47. A razão  $\bar{H}_{b3}/\bar{H}_{b1}$ , correspondente à atenuação da altura da onda entre a barra externa e a face da praia, obteve um valor médio de 0.27 (73% de atenuação) para a totalidade das observações e de 0.18 (82% de atenuação) caso se utilizem apenas as ondas do grupo RI1.

**Tabela 4.1.** Valores de altura das ondas nas várias linhas de rebentação, relações de atenuação da altura para cada conjunto de ondas e classificação de rebentação significativa ou incompleta, na 1ª (Grupo 1) e na 2ª (Grupo 2) linhas de rebentação, para Tocha 92.

Dia/Hora	$H_{b1}$ (m)	$H_{b2}$ (m)	$H_{b3}$ (m)	$H_{b2}/H_{b1}$	$H_{b3}/H_{b2}$	$H_{b3}/H_{b1}$	Grupo 1	Grupo 2
29 - 9h00m	2.5	1.4	0.6	0.56	0.43	0.24	RI1	RS2
29 - 18h00m	3.0	1.7	0.8	0.57	0.47	0.27	RI1	RS2
30 - 9h30m	2.75	1.2	0.6	0.44	0.50	0.22	RI1	RI2
30 - 18h00m	3.0	1.55	0.65	0.51	0.42	0.22	RI1	RS2
1 - 10h00m	4.5	1.9	0.85	0.42	0.45	0.19	RS1	RS2
1 - 17h30m	5.0	1.8	0.6	0.36	0.33	0.12	RS1	RS2
2 - 9h30m	4.5	1.75	0.75	0.39	0.43	0.17	RS1	RS2
3 - 9h30m	4.75	1.6	0.8	0.34	0.50	0.17	RS1	RS2
4 - 10h00m	5.5	1.7	0.9	0.31	0.53	0.16	RS1	RS2
5 - 15h00m	4.0	1.65	0.8	0.41	0.48	0.20	RS1	RS2
6 - 13h30m	2.5	1.8	1.0	0.72	0.56	0.40	RI1	RS2
8 - 14h00m	5.0	2.1	1.0	0.42	0.48	0.20	RS1	RS2
9 - 16h30m	3.0	1.65	0.8	0.55	0.48	0.27	RI1	RS2
10 - 14h30m	3.5	1.6	NM	0.46	NC	NC	RS1	RS2
10 - 16h30m	3.75	2.0	0.95	0.53	0.48	0.25	RS1	RS2
11 - 16h30m	3.5	1.6	0.7	0.46	0.44	0.20	RS1	RS2
12 - 17h00m	1.7	1.25	0.9	0.74	0.72	0.53	RI1	RI2
13 - 17h30m	1.3	1.25	0.9	0.96	0.72	0.69	RI1	RI2
14 - 10h00m	1.5	NM	0.55	NC	NC	0.37	RI1	RS2
14 - 17h30m	1.4	1.25	0.75	0.89	0.60	0.54	RI1	RI2
15 - 9h15m	1.6	1.35	0.8	0.84	0.59	0.50	RI1	RI2
16 - 9h15m	6.5	1.9	0.9	0.29	0.47	0.14	RS1	RS2

NM - Não medido; NC - Não calculado

#### 4.4. DISCUSSÃO

Na figura 4.1., encontram-se expressos os valores de  $\bar{H}_{b1}$ , comparados com os valores de  $\bar{H}_{b2}$  e  $\bar{H}_{b3}$ , estando indicados os conjuntos de ondas com rebentação significativa e com rebentação incompleta.

Na figura 4.1.a pode observar-se que as ondas do tipo RI1 (Rebentação Incompleta na 1ª linha) possuíram valores de  $\bar{H}_{b1} < 3.3$  m. Os trens de ondas onde se verificou  $\bar{H}_{b1} > 3.3$  m estiveram sempre englobados no conjunto denominado RS1 (Rebentação Significativa na 1ª linha), para o qual um número significativo de ondas (ou todas) rebentavam sobre a barra externa.

As ondas do grupo RI1 possuíram reduções na altura média de 10% a 50%, entre a 1ª e a 2ª linha de rebentação e de 50% a 75% entre a 1ª e a 3ª linha de rebentação, enquanto que as ondas do grupo RS1 apresentaram reduções da ordem dos 50% a 75% da 1ª para a 2ª linha de rebentação e de 75% a 90% entre a barra externa e a face da praia. Estes valores demonstram a importância da rebentação sobre

as barras como factor modificador do comportamento na altura das ondas.

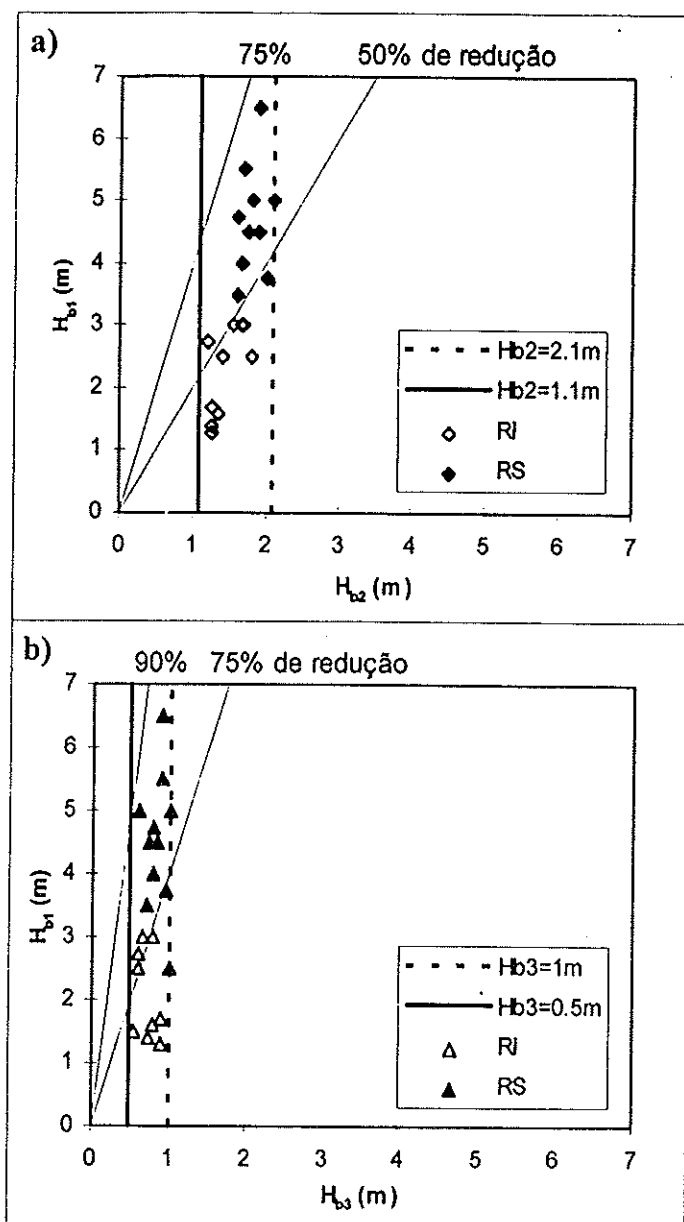


Figura 4.1. Atenuação da altura das ondas entre rebentações: a) Relação entre alturas de ondas na barra externa e na barra interna; b) Relação entre alturas de ondas na barra externa e na face da praia. RI, rebentação incompleta; RS, rebentação significativa.

A análise da figura 4.1. permite uma observação que pode ser ainda mais esclarecedora sobre o papel das barras na atenuação da altura das ondas. É visível que, de forma quase independente da altura inicial, as alturas das ondas na rebentação sobre a barra interna ou sobre a face da praia possuem gamas de variação relativamente restritas. Estas, correspondem a intervalos entre 1.1 m e 2.1 m, para a barra interna, e de 0.5 m a 1.0 m, na face da praia. Este facto traduz uma enorme capacidade de amortecimento e atenuação das ondas pela rebentação sobre as barras, minimizando a actuação directa da agitação na rebentação sobre a face da praia. Efectivamente, a

altura final actuante junto à praia esteve sempre contida entre limites bem definidos, devendo depender fortemente da profundidade a que a barra se encontra estabelecida. O mesmo tinha sido já verificado por Hardy e Young (1996) num estudo de atenuação de ondas sobre recifes. Os autores referem que os valores das alturas significativas ou das alturas máximas são limitados superiormente a cerca de 40-60% da profundidade da água sobre o recife, sendo este factor condicionante da altura da onda reformada. Assim, a localização da crista do obstáculo (barra submersa, recife, etc.) a uma maior profundidade implicaria menores taxas de atenuação, enquanto que uma menor profundidade implicaria maior atenuação.

Os valores obtidos para as taxas relativas às razões entre a altura de onda reformada e a altura de onda incidente concordam com as estimativas feitas por outros autores, através da análise de dados de campo ou de laboratório, para ondas que rebentam completamente. Essas estimativas encontram-se sintetizadas na tabela 4.2..

Tabela 4.2. Relação entre  $\bar{H}_r$  (altura média da onda reformada) e  $\bar{H}_{bi}$  (altura média da onda na rebentação anterior à reformação; no caso em estudo  $i$  pode tomar os valores 1 e 2), de acordo com vários autores.

Referência	$\bar{H}_r / \bar{H}_{bi}$
Keady e Coleman (1980)	0.25-0.50
Carter e Balsillie (1983)	0.20-0.65
Battjes e Stive (1985)	0.53-0.68
Watanabe e Dibajnia (1988)	0.6
Aagaard (1989)	0.67
Kamphuis (1994)	0.35-0.65

Utilizando o conjunto de dados de campo mais significativo de entre todos os autores referidos, pertencente ao trabalho de Carter e Balsillie (1983), é possível estabelecer uma relação média  $\bar{H}_r / \bar{H}_{bi}$ , para locais com duas ou três linhas de rebentação, analisados nesse mesmo estudo. As relações obtidas pela análise dos dados publicados pelos autores, para a razão entre a 1ª e a 2ª linha de rebentação, estão sintetizadas nas expressões que de seguida se apresentam, onde se incluem igualmente o local de recolha de informação e o número de observações (n) utilizadas:

$$\text{Florida (EUA), } n = 10 \qquad \bar{H}_r / \bar{H}_{bi} = 0.43,$$

$$\text{Magilligan (Irlanda), } n = 56 \qquad \bar{H}_r / \bar{H}_{bi} = 0.39,$$

Lough Neagh (Irlanda), n = 6

$$\bar{H}_r / \bar{H}_{bi} = 0.45,$$

Média ponderada, n = 72

$$\bar{H}_r / \bar{H}_{bi} = 0.40.$$

O valor médio ponderado obtido para o conjunto de todas as observações é exactamente igual ao obtido na campanha Tocha 92 para a razão  $\bar{H}_{b2} / \bar{H}_{bi}$  do conjunto de ondas RS1 (0.40), verificando-se que todos os valores médios se situam entre 0.39 e 0.45, para qualquer das praias analisadas, independentemente das condições de agitação e de morfologia. Registe-se que as características das praias da península de Magilligan (*vide* Carter e Stone, 1989) não são de todo semelhantes às ocorrentes na Praia da Tocha, apesar das razões  $\bar{H}_r / \bar{H}_{bi}$  obtidas serem praticamente iguais. Na realidade, as praias de Magilligan possuem menor pendor, um comportamento genericamente dissipativo a intermédio e uma granulometria média globalmente menor do que em Praia da Tocha. Em comum, possuem o facto de serem ambas costas abertas, com barras (com menor altura e largura em Magilligan), a ocorrência de tempestades com elevada energia associada e a existência de um cordão dunar importante no seu limite interior.

Para a obtenção de dados respeitantes a relações entre a segunda e a terceira rebentação, Carter e Balsillie (1983) efectuaram uma experiência na praia de Lough Neagh (Irlanda), registando 13 observações, com um valor médio de 0.34 para a razão  $\bar{H}_{b3} / \bar{H}_{b2}$ , inferior à registada para os dados da Tocha. No entanto, a razão entre a terceira e a primeira rebentação, para a mesma praia, possui um valor médio de 0.17, muito semelhante ao valor de 0.18 obtido para Palheiros da Tocha, apesar de serem respeitantes a alturas de ondas e morfologias de praias completamente diferentes.

Desta forma, parece ser possível aceitar que, em praias naturais não intervencionadas existe, em média, uma redução da altura da ondulação em cerca 60% entre a 1ª e a 2ª linha de rebentação e uma atenuação total de 82% (entre a 1ª e a 3ª linha de rebentação). Contudo, dado que as variações entre extremos são relativamente acentuadas, será necessário um método mais eficaz para determinar estas relações caso a caso.

Na figura 4.2. comparam-se os valores de  $\bar{H}_{b2} / \bar{H}_{bi}$  observados nas onze situações em que ocorreu rebentação completa sobre a barra externa, na campanha Tocha 92, com as previsões dos vários métodos descritos anteriormente e expressos

pelas equações 4.2 (Suhayda e Roberts, 1977), 4.3 (Keady e Coleman, 1980) e 4.5 (Balsillie, 1984a). A linha negra marca a igualdade entre previsões e observações, verificando-se que nenhum dos métodos consegue descrever de forma correcta as observações efectuadas. As equações 4.2 e 4.3 conseguem prever de forma aproximadamente correcta a tendência de comportamento das observações mas com uma sobrestima acentuada. As previsões obtidas pela formulação de Balsillie, apesar de apresentarem menores desvios médios relativamente às observações, são as que mais se afastam da realidade, em termos de tendência de comportamento. As diferenças de comportamento relativamente às outras fórmulas e às observações prendem-se com a introdução do período de onda, que parece não possuir relação directa com a reformação da onda, para os dados observados.

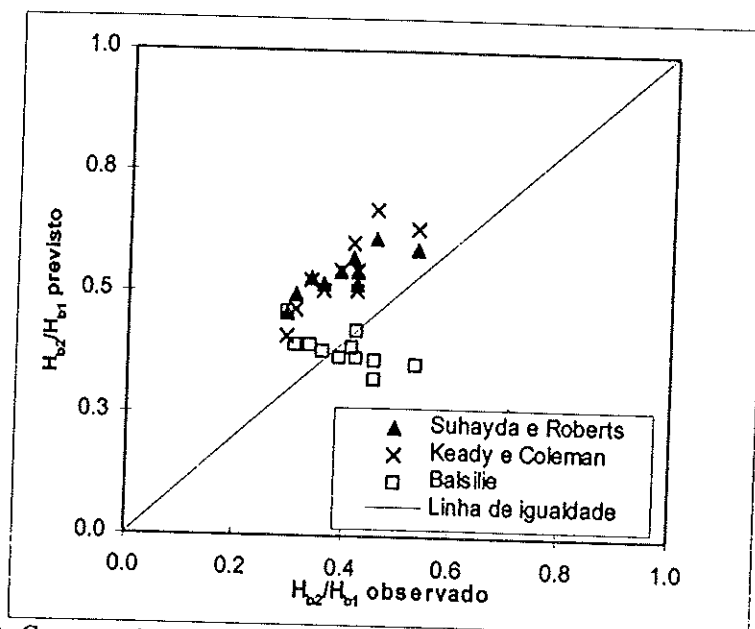


Figura 4.2. Comparação entre as relações de  $H_{b2}/H_{b1}$  observadas e previstas por três métodos.

A utilização das equações 4.2 e 4.3, obriga à introdução do valor de  $d_c$  (profundidade de água sobre a crista da barra). Dada a inexistência de medições no campo, este parâmetro foi calculado utilizando o valor de altura significativa correspondente à altura crítica ( $H_s \approx 3.3$  m) e multiplicando-o por 1.28, de acordo com a relação  $d_b = 1.28H_b$  (Munk, 1949), onde  $d_b$  é a profundidade na rebentação. Neste caso considerou-se que  $d_b$  seria igual ou próximo de  $d_c$ , ou seja, a rebentação ocorreria sobre a crista da barra. Esta aproximação pode introduzir erros, quer por se considerar a igualdade entre  $d_b$  e  $d_c$ , quer pela utilização do valor de 1.28 na relação definida. O valor médio de  $d_c$  obtido desta forma foi igual a 4.2 m, isto é, durante as medições

efectuadas a profundidade da crista da barra estaria, em média, a 4.2 m de profundidade.

Para avaliar até que ponto o desvio das equações 4.2 e 4.3 relativamente às observações seria dependente do valor de  $d_c$  introduzido, decidiu-se variar  $d_c$  até que ocorresse uma aproximação dos valores previstos à linha de igualdade. Constatou-se que, para se atingir uma melhor aproximação entre observações e previsões, se teria de recorrer a valores de  $d_c = 2$  m (para a equação 4.2) e de  $d_c = 2.7$  m (para a equação 4.3), bastante inferiores ao valor utilizado. No entanto, a ocorrência de qualquer destes valores durante a experiência de campo seria impossível, visto que todas as medições foram efectuadas em maré alta, a um nível médio próximo de 3 m ZH, pelo que, se os valores expressos estivessem correctos, a crista da barra seria visível durante a maré baixa, o que não aconteceu. De acordo com a previsão efectuada neste trabalho, a crista da barra estaria, em média, a cerca de -1.2 m ZH, o que parece concordar com as observações no campo.

Admitindo que o valor de 4.2 m é um valor aproximadamente correcto para  $d_c$  médio, importa conhecer a causa do desfasamento das equações relativamente à realidade. Um dos factores poderá ser o facto de ambas as equações terem sido obtidas em condições muito diferentes das registadas na experiência Tocha 92. A equação 4.2 foi elaborada para rebentação sobre recifes, onde a profundidade  $d_c$  é sempre muito pequena e a equação 4.3 foi desenvolvida para condições laboratoriais, onde o valor de  $d_c$  é sempre muito reduzido, encontrando-se igualmente afectado por problemas de escala. Assim, não é de estranhar que as equações tendam a sobrestimar os valores de  $\bar{H}_r / \bar{H}_i$ , com o aumento de  $d_c$ . Outra razão será a utilização de um valor único, médio, para  $d_c$ , quando este valor deverá ter sofrido alguma variação no decorrer da campanha. Por forma a proceder a uma calibração das fórmulas para as condições observadas na Praia da Tocha, foi feita uma alteração dos coeficientes empíricos de cada equação, aproximando as suas previsões das observações efectuadas. A calibração recorreu ao método dos mínimos quadrados e comparou as previsões com as observações. As equações assim obtidas foram:

$$\bar{H}_r / \bar{H}_b = 0.74 - 0.59e^{(0.6d_c/H_i)} \quad (4.8)$$

$$H_r/H_b = 0.42(H_i/d_c)^{-0.8} \quad (4.9)$$

sendo visível na figura 4.3. o ajuste dos dados à linha de igualdade, com a utilização dos novos coeficientes empíricos. No entanto, a equação 4.8 traduz um ligeiro desvio relativamente ao comportamento da linha de igualdade, indicando que para valores de  $H_{b2}/H_{b1}$  inferiores a 0.3 ou superiores a 0.6 a previsão poderá não ser correcta. Testou-se, então, a variabilidade de apenas um dos coeficientes, determinando-se como melhor ajuste a equação:

$$H_r/H_b = 1.0 - 1.05e^{(0.6d_r/H_r)} \quad (4.10)$$

que parece permitir uma previsão de comportamento mais adequada ao observado e muito próxima da obtida pela aplicação da equação 4.9 (figura 4.3.).

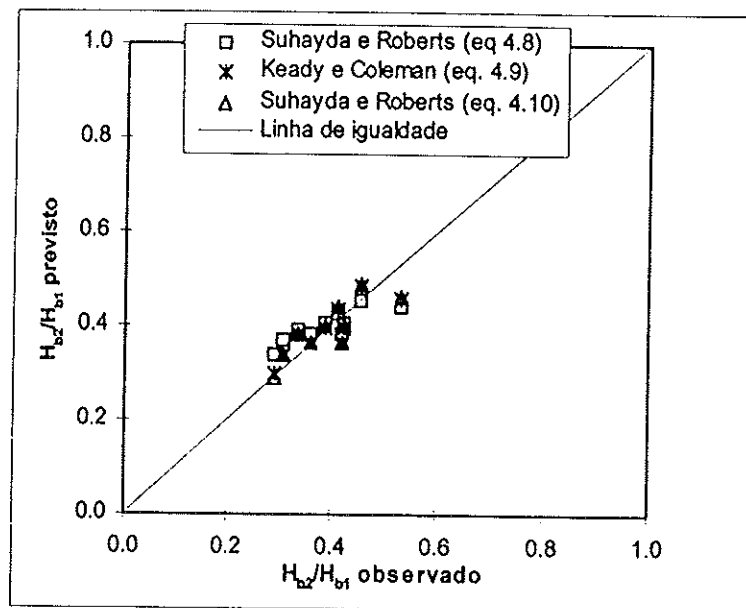


Figura 4.3. Comparação entre as relações de  $H_{b2}/H_{b1}$  observadas e previstas após calibração dos métodos.

Para aquilatar de forma fidedigna da possibilidade de utilização destas formulações, para a costa em questão, com os novos coeficientes empíricos determinados ou com outros ainda mais adequados, deverá proceder-se à aquisição de dados complementares, se possível com obtenção de valores diferentes e precisos de  $d_c$ , visto que este assume um valor constante de 4.2 m para as fórmulas agora desenvolvidas.

#### 4.5. SÍNTESE

A análise das taxas de atenuação da altura das ondas entre rebentações sucessivas aponta para valores médios de atenuação de 60% entre a primeira e a segunda linha de rebentação e de 82% desde a rebentação inicial até à altura na rebentação final, sobre a face da praia. Estes valores, concordantes com os expressos por Carter e Balsillie (1983), permitem indicar a grande importância do papel das barras no amortecimento da altura da onda com incidência directa sobre a face da praia, minimizando os efeitos erosivos associados. Contudo, os valores apontados reflectem situações médias, para as condições de agitação existentes, verificando-se uma variação elevada entre extremos. Desta forma, torna-se necessário possibilitar a previsão das taxas associadas a cada condição de agitação, através de formulações. Neste trabalho optou-se pela utilização de equações determinadas empiricamente, onde se relaciona a altura da onda reformada com a altura da onda incidente e com a profundidade da coluna de água na rebentação. Tendo por base as equações propostas por Suhayda e Roberts (1977) e por Keady e Coleman (1980), determinaram-se, respectivamente, as formulações  $H_r/H_b = 1.0 - 1.05e^{(0.6d_c/H_i)}$  e  $H_r/H_b = 0.42(H_i/d_c)^{-0.8}$ .

Estas equações correspondem ao melhor ajuste obtido para os dados respeitantes às ondas com rebentação completa sobre a barra externa, na campanha Tocha 92. Deve referir-se, no entanto, que são ajustes condicionados pela utilização de um valor médio estimado de  $d_c = 4.2$  m, dada a impossibilidade de utilização de valores medidos no campo. Assim, será possível que os coeficientes empíricos das formulações necessitem de sofrer ajustes em função da variabilidade de  $d_c$ .

Para a zona de estudo, há ainda a referir a menor volumetria e o maior número de interrupções das barras submersas no sector setentrional (Ferreira, 1993). Uma barra com menor volumetria ou com separações mais frequentes poderá, conseqüentemente, apresentar valores médios de  $d_c$  mais elevados, para condições de agitação semelhantes. Assim, a atenuação da onda por rebentação será menor, havendo uma maior altura de onda a actuar directamente sobre a face da praia.

Uma das principais conclusões a reter do presente capítulo resulta da análise da figura 4.1., sendo evidente a existência de limites para a altura média das ondas que rebentavam sobre a barra interna e sobre a face da praia. Esses limites situaram-se, para os dados da campanha Tocha 92, entre 1.1 m e 2.1 m para a barra interna e de 0.5

m a 1.0 m para a face da praia, devendo ser igualmente dependentes do valor de  $d_c$ . Admitindo valores médios para  $d_c$  de 4.2 m para a barra externa ( $d_{c1}$ ) e de 1.8 m para a barra interna ( $d_{c2} = 1.28H_c = 1.28*1.4 = 1.8$  m), verifica-se que as relações de  $H_r$  ( $H_{b2}$  e  $H_{b3}$ ) com  $d_{c1}$  e  $d_{c2}$  são traduzidas por:

$$0.28 < H_{b3}/d_{c2} < 0.55 \quad \text{e} \quad 0.26 < H_{b2}/d_{c1} < 0.50.$$

A altura da onda reformada situa-se, genericamente, entre 25% e 50% do valor médio de profundidade a que se situa a crista da barra submersa. Esta conclusão poderá ser importante, em conjugação com as anteriormente apontadas, para o desenho de barras ou de obstáculos submersos com vista à atenuação directa da onda sobre a praia, permitindo estabelecer critérios de dimensionamento em casos de realimentação artificial de barras submersas.

## 5. DISSIPACÃO DA ENERGIA DAS ONDAS NA REBENTAÇÃO

### 5.1. INTRODUÇÃO E CONCEITOS TEÓRICOS

Na sua aproximação à costa, as ondas vão sofrendo dissipação de energia por interação com o fundo. Contudo, a principal causa de dissipação de energia das ondas incidentes é a rebentação (Battjes e Stive, 1985) ou as sucessivas rebentações aquando da existência de praias com barras submersas (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1995). A extensão de área sobre a qual o processo de rebentação e, conseqüentemente, a dissipação de energia se processa, é extremamente dependente do tipo de rebentação (Carter, 1988). Em praias submersas com pendor suave e onde o tipo de rebentação progressiva ("spilling") é predominante, a dissipação de energia por rebentação pode ocorrer em grandes extensões. Pelo contrário, em praias com pendores elevados e rebentação mergulhante ("plunging") predominante, a dissipação de energia processa-se em escassos metros. A ocorrência dos dois processos em simultâneo, numa mesma praia, é possível caso exista uma praia submersa com barra de pendor suave, onde predomine a rebentação progressiva, seguida de uma zona de cava onde ocorra reformação das ondas e de uma face da praia reflectiva, onde a onda rebente de forma violenta (rebentação mergulhante). É igualmente possível que se verifiquem, para a mesma praia, as duas situações de dissipação de energia com um desfasamento de apenas algumas horas. Em praias com amplitude de maré elevada e onde exista uma face da praia reflectiva e um terraço de maré com pendor suave, é frequente a ocorrência de rebentação mergulhante durante a maré alta e de rebentação progressiva na maré baixa.

Nas praias da zona em estudo verifica-se uma tendência para a ocorrência das duas situações atrás descritas. Isto é, o menor pendor da praia submersa faz com que nem todas as ondas aí rebentem de forma mergulhante e que muitas o façam progressivamente, nomeadamente sobre a barra externa. Na face da praia, durante a maré alta, a rebentação é normalmente mergulhante, transitando para progressiva com o baixar da maré, sobretudo durante as marés vivas. Neste trabalho, por forma a ter valores comparáveis na análise da dissipação de energia, apenas se utilizaram dados de agitação obtidos durante a maré alta, onde é mais importante o conhecimento sobre a atenuação da energia, visto ser nesta fase da maré que as máximas transformações da

praia ocorrem, que os níveis máximos de actuação podem ser atingidos e que os galgamentos e/ou as danificações de edificações podem acontecer. Assim, toda a análise seguinte, dentro deste capítulo, dirá unicamente respeito à dissipação de energia das ondas ao longo da zona de rebentação, durante a maré alta, não se efectuando comparações com a atenuação de energia em período de maré baixa.

O estudo tem como objectivos caracterizar o efeito das barras na atenuação da energia das ondas incidentes, para a área em estudo, e prever a actuação das mesmas em condições de sobrelevação do nível do mar. Ter-se-á sempre em atenção que as barras funcionam como factor de protecção relativamente a tempestades e de controlo de estabilidade das praias e das dunas adjacentes (Carter e Balsillie, 1983).

## 5.2. ESTUDOS PRÉVIOS

Não são muitos os estudos publicados, com base em trabalhos de campo, que tiveram como objectivo a caracterização da dissipação de energia por rebentação sobre barras, ainda que existam vários modelos numéricos que reproduzam o processo, estando alguns deles referidos sucintamente no sub-capítulo 4.2. Nesta síntese de trabalhos será dada ênfase apenas aos trabalhos que tenham efectivamente comparado valores obtidos em experiências de campo, com o intuito de determinar a atenuação da energia ao longo da zona de rebentação.

O mais importante trabalho em acordo com as condições mencionadas é o de Carter e Balsillie (1983), onde a energia é calculada usando a teoria da onda solitária através das expressões de Munk (1949). Os dados apresentados foram obtidos em praias da Florida e da Irlanda, para condições energéticas baixas a moderadas e para uma grande variedade de condições morfológicas, integrando praias com barra única ou com múltiplas barras. Os autores mencionam uma perda de energia entre 78% e 99% (com média de 91%) para praias com barra única e entre 80% a 99% (com média de 94%) para praias com múltiplas barras. Assim, em geral, uma onda reformada contém, em média, menos do que um décimo da sua energia incidente original. Para Carter e Balsillie (1983) este valor é em grande parte dependente do processo de rebentação ter ou não sido completo, bem como da razão  $C/W_1$ , onde  $C$  é a velocidade da onda e  $W_1$  é a largura da zona de "surf".

Battjes e Stive (1985) calibraram um modelo de dissipação de energia para ondas aleatórias recorrendo a dados de testes laboratoriais e de campo, entre os quais se encontram duas séries de dados obtidas numa praia holandesa (Egmond), onde estavam presentes duas barras submersas. Foram obtidos dados de transformação de altura da onda, que podem ser convertidos em dissipação de energia pela rebentação, admitindo que os restantes processos envolvidos na dissipação podem ser desprezáveis. Para o caso em que ocorreu uma tempestade, com rebentação sobre ambas as barras, e aplicando a teoria da onda solitária aos dados publicados, regista-se uma atenuação de energia em cerca de 94% pela acção conjunta das duas barras.

Oelerich e Dette (1988) consideram não ser possível representar o processo de dissipação de energia sobre barras utilizando unicamente soluções matemáticas fechadas, devido à natureza estocástica do processo, pelo que se deve recorrer a expressões com fundamento analítico e/ou empírico. Os autores compararam o resultado de várias formulações existentes com dados de laboratório (tanques de ondas de grande escala) e de campo (Ilha de Sylt, Mar do Norte). Em medições efectuadas no tanque de ondas, para ondas com período de pico de 6 s e 1.5 m de altura, a dissipação de energia na zona de rebentação foi de 95% (valor compatível com os resultados de campo apresentados nos trabalhos anteriormente citados). Relativamente às formulações testadas, verificou-se um bom ajuste entre a generalidade dos modelos e os dados experimentais quando a rebentação foi progressiva, não se registando o mesmo para a rebentação mergulhante. Nos testes produzidos em tanques de ondas a previsão dos modelos foi globalmente satisfatória, facto que já não se verificou relativamente aos dados de campo.

Tendo por base o trabalho experimental de Carter e Balsillie (1983), Ferreira *et al.* (1994) publicaram um estudo sobre a dissipação de energia numa praia aberta com duas barras submersas (Palheiros da Tocha). Os autores compararam os valores da altura da onda na 1ª linha de rebentação, estimados pela teoria da onda solitária a partir da altura ao largo, com os valores estimados visualmente para a 2ª e 3ª linhas de rebentação. A dissipação total de energia obtida cifrou-se entre 83.7% e 99.7%, para um conjunto de ondas com alturas compreendidas entre 1.5 m e 5.4 m, na primeira rebentação. O referido trabalho está na base do capítulo aqui exposto, onde se reavaliam os mesmos dados. Pretende-se, ainda, completar o estudo iniciado, integrando o efeito de sobrelevação em temporais.

### 5.3. RESULTADOS

Os dados utilizados no presente estudo, para o cálculo da energia dissipada, foram os valores estimados visualmente da altura da ondulação na rebentação, para a experiência Tocha 92. Não foi possível integrar os dados referentes à campanha Areão 95 por não ter ocorrido, nessa campanha, rebentação significativa sobre qualquer barra submersa, durante a maré alta, mas apenas sobre a face da praia.

O cálculo da energia ( $E$ ) associada à altura média das ondas, em cada linha de rebentação, foi efectuado recorrendo-se à teoria da onda solitária (Munk, 1949), de acordo com a expressão:

$$E = 1.54\rho g(H_b/d_b)^{1.5}d_b^3 \quad (5.1)$$

que pode ser simplificada na forma:

$$E = 22.4H_b^3 \quad (5.2)$$

utilizando  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho = 1.025 \text{ kg/m}^3$  e  $d_b = 1.28H_b$ .

Inman (1963) considera que, em águas pouco profundas, especialmente na zona de rebentação, há uma tendência para as ondas constituírem cristas isoladas, separadas por cavas relativamente aplanadas. Komar (1976) afirma que se o período da onda for adequadamente longo e a crista isolada por cavas acentuadas, a teoria da onda solitária deve ser utilizada. Refere, igualmente, que devido à similaridade da onda solitária com as ondas reais e pela sua simplicidade de aplicação, esta teoria tem tido largo uso em estudos na praia submersa, geralmente recorrendo às equações de Munk (1949). Por sua vez, Munk (1949) considera que o bom resultado da aplicação desta teoria a ondas próximas da costa se deve à representação da concentração do volume e da energia próximo da crista da onda. Assim, recorreu-se à teoria da onda solitária por se considerar esta teoria genericamente mais representativa das condições na rebentação do que a teoria da onda linear, mais adequada às condições ao largo. Outro factor preponderante nesta escolha foi a possibilidade de comparação dos resultados obtidos com os de Carter e Balsillie (1983), num estudo de características semelhantes.

Utilizando a energia das ondas calculada para cada rebentação determinou-se a energia absoluta dissipada ( $E_D$ ), por subtração simples:

$$E_{D_{i,i+x}} = E_{b_i} - E_{b_{i+x}} \quad (5.3)$$

onde  $b_i$  e  $b_{i+x}$  indicam as condições nas linhas de rebentação  $i$  e  $i+x$ , respectivamente. É ainda possível calcular a taxa de energia relativa dissipada, entre linhas de rebentação, adimensional, usando a equação:

$$T_{D_{i,i+x}} = (E_{b_i} - E_{b_{i+x}})/E_{b_i} \quad (5.4)$$

Os valores adimensionais resultantes da equação 5.4 são facilmente convertidos em percentagens de dissipação de energia, através da sua multiplicação por 100.

A tabela 5.1. apresenta os valores de energia das ondas associada às sucessivas rebentações observadas ( $E_{b1}$ ,  $E_{b2}$  e  $E_{b3}$ ) na zona de estudo, bem como as taxas de energia dissipada entre diferentes linhas de rebentação.

**Tabela 5.1.** Súmula dos valores de energia e de dissipação de energia entre rebentações para a campanha Tocha 92.

$E_{b1}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$E_{b2}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$E_{b3}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$E_{D1,2}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$T_{D1,2}$	$E_{D2,3}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$T_{D2,3}$	$E_{D1,3}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$T_{D1,3}$
350.0	61.5	4.8	288.5	0.824	56.7	0.921	345.2	0.986
604.8	110.1	11.5	494.7	0.818	98.6	0.896	593.3	0.981
465.9	38.7	4.8	427.2	0.917	33.9	0.875	461.1	0.990
604.8	83.4	6.2	521.4	0.862	77.2	0.926	598.6	0.990
2041.2	153.6	13.8	1887.6	0.925	139.8	0.911	2027.4	0.993
2800.0	130.6	4.8	2669.4	0.953	125.8	0.963	2795.2	0.998
2041.2	120.1	9.5	1921.1	0.941	110.6	0.921	2031.7	0.995
2400.7	91.8	11.5	2308.9	0.962	80.3	0.875	2389.2	0.995
3726.8	110.1	16.3	3616.7	0.971	93.8	0.852	3710.5	0.996
1433.6	100.6	11.5	1333.1	0.930	89.1	0.886	1422.1	0.992
350.0	130.6	22.4	219.4	0.627	108.2	0.829	327.6	0.936
2800.0	207.4	22.4	2592.6	0.926	185.0	0.892	2777.6	0.992
604.8	100.6	11.5	504.2	0.834	89.1	0.886	593.3	0.981
1181.3	179.2	19.2	1002.1	0.848	160.0	0.893	1162.1	0.984
960.4	91.8	7.7	868.6	0.904	84.1	0.916	952.7	0.992
110.1	43.8	16.3	66.3	0.603	27.5	0.627	93.7	0.852
49.2	43.8	16.3	5.5	0.111	27.5	0.627	32.9	0.668
75.6	49.2	3.7	26.4	0.349	45.5	0.924	71.9	0.951
61.5	43.8	9.5	17.7	0.288	34.3	0.784	52.0	0.846
91.8	55.1	11.5	36.7	0.399	43.6	0.792	80.3	0.875
6151.6	153.6	16.3	5998.0	0.975	137.3	0.894	6135.3	0.997
Médias				0.760		0.861		0.952

## 5.4. DISCUSSÃO

### 5.4.1. Dissipação de energia por rebentação

Pela análise da tabela 5.1. é possível registrar que a maior parte da energia foi dissipada na primeira linha de rebentação, sobre a barra externa. No entanto, a importância relativa da segunda linha de rebentação foi maior, pois possuiu um valor médio de atenuação da energia incidente de 86.1%, contra os cerca de 76.0% de dissipação entre a 1ª e a 2ª linha de rebentação. Estes valores médios foram obtidos para a generalidade das ondas incidentes observadas. Se forem apenas analisadas as ondas com rebentação significativa (grupos RS1 e RS2), verifica-se que as médias de dissipação de energia são mais próximas entre si, sendo respectivamente de 93.4% e de 89.8% para  $T_{D1,2}$  e  $T_{D2,3}$  (tabela 5.2.).

Os valores de dissipação entre a barra externa e a face da praia ( $T_{D1,3}$ ) mostram que a quase totalidade das ondas possuiu uma atenuação de energia superior a 80%, tendo várias delas valores de dissipação superiores a 99%. A média do total dos valores obtidos é de 95.2%, enquanto que a média de energia dissipada para as ondas com rebentação significativa (grupo RS1) é de 99.3%, valores similares aos obtidos por Carter e Balsillie (1983), Battjes e Stive (1985) e Oelerich e Dette (1988). Na tabela 5.2. está expressa uma comparação entre os valores obtidos para os dados de Tocha 92 (grupo RS1) relativamente aos dados de Carter e Balsillie (1983) para a praia de Lough Neagh, onde também existiam duas barras.

**Tabela 5.2.** Comparação de taxas de dissipação de energia (min/med/max) entre linhas com rebentação completa para os dados de Tocha 92 e Lough Neagh.

Taxa de dissipação	Tocha 92	Lough Neagh*
$T_{D1,2}$	0.848 / 0.934 / 0.975	0.802 / 0.902 / 0.970
$T_{D2,3}$	0.829 / 0.898 / 0.963	0.888 / 0.956 / 0.992
$T_{D1,3}$	0.984 / 0.993 / 0.998	0.986 / 0.994 / 0.999

\* Utilizando dados de Carter e Balsillie (1983)

É possível observar a semelhança nos resultados dos dois locais, sobretudo para os valores totais, parecendo indicar um comportamento global similar para as duas praias, independente das condições morfológicas e oceanográficas de cada uma

delas. Este facto, já verificado anteriormente na transformação da altura da onda, pode estar relacionado com a adequação da morfologia e, em particular, das barras, ao tipo de clima de agitação existente em cada região.

A dissipação de energia na área de estudo pode ser observada em função da agitação, utilizando-se um parâmetro adimensional relativo à altura da onda na 1ª linha de rebentação, denominado por parâmetro de escala de agitação ( $\Lambda$ ), dado por:

$$\Lambda = H_{b1}/H_{b1max} \quad (5.5)$$

onde  $H_{b1}$  toma os valores de altura de onda na primeira linha de rebentação e  $H_{b1max} = 6.5$  m (máxima altura verificada na rebentação, em Tocha 92). Este parâmetro de escala permite uma padronização dos valores de agitação relativamente ao máximo observado, estabelecendo uma taxa adimensional, directamente comparável com a taxa adimensional de energia relativa dissipada. A relação  $T_{D1,3}$  versus  $\Lambda$  pode ser observada na figura 5.1., mostrando que para valores baixos de  $H_{b1}$  a energia dissipada é também pequena (taxas de dissipação menores). À medida que  $\Lambda$  se aproxima de 1 ( $H_{b1}$  tende para 6.5 m) o valor de  $T_{D1,3}$  vai aumentando, até atingir valores próximos de 0.997 (taxa de dissipação associada a rebentação com 6.5 m). Para  $\Lambda > 1$ ,  $T_{D1,3}$  terá valores superiores a 0.997, tendendo para 1, sem atingir esse valor (dissipação total de energia).

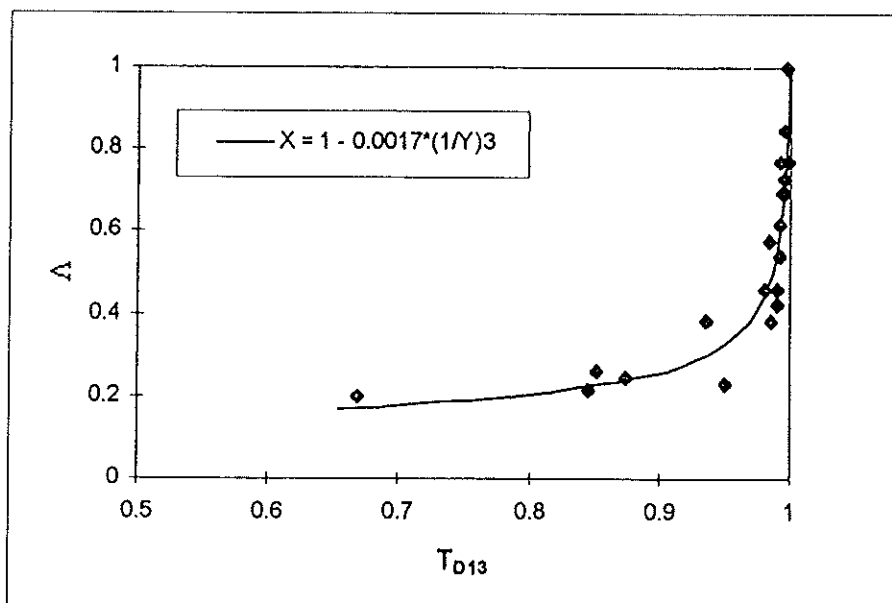


Figura 5.1. Representação gráfica do melhor ajuste entre  $T_{D1,3}$  e  $\Lambda$ , para os dados de Tocha 92.

O ajuste entre  $\Lambda$  e  $T_{D1,3}$ , pode ser dado por uma expressão do tipo:

$$T_{D1,3} = 1 - a(1/\Lambda)^3 \quad (5.6)$$

onde  $a = 0.0017$  para os dados em causa (figura 5.1.). O valor de  $a$  deverá ser variável em função da volumetria das barras e da altura da coluna de água sobre elas, permitindo que a progressão para valores de  $T_{D1,3} = 1$  se processe mais rapidamente ou mais lentamente, em função desses parâmetros.

#### 5.4.2. Efeito da sobrelevação do nível do mar

Durante a ocorrência de uma sobrelevação do nível do mar verifica-se um aumento na profundidade de água na zona de pré-praia (“nearshore”), o que se traduz num aumento da acção da ondulação junto à praia e, conseqüentemente, num aumento do potencial para a existência de níveis mais elevados de erosão e/ou de danificações (Van de Graaff, 1986; Dolan e Davis, 1994). A existência de um aumento na profundidade de água em um valor igual ao da sobrelevação vai alterar e condicionar o efeito de amortecimento do fundo e, em particular, das barras, visto que durante uma situação de sobrelevação o valor de altura da onda máxima à qual se torna possível atravessar a barra sem rebentar será superior, relativamente às mesmas condições mas sem sobrelevação.

Admitindo que a rebentação das ondas se processa de acordo com a relação  $\gamma = d_b/H_b$ , onde  $\gamma = 1.28$  (Munk, 1949), é possível determinar o valor de altura modificada na rebentação ( $H_{bm}$ ) por efeito de sobrelevação, recorrendo à expressão:

$$H_{bm} = 0.78(d_b + S) \quad (5.7)$$

onde  $S$  é o valor de sobrelevação registado. Substituindo  $d_b$  por  $1.28H_b$ , obtém-se a equação:

$$H_{bm} = H_b + 0.78S \quad (5.8)$$

que permite calcular  $H_{bm}$  como função da altura não modificada na rebentação e da sobrelevação verificada.

Para o caso estudado (Tocha 92), é possível considerar que as alturas críticas acima das quais ocorreu rebentação significativa ( $H_{c1} = 3.3$  m,  $H_{c2} = 1.4$  m, *vide* capítulo 4) serão alteráveis por acção de sobrelevação do nível do mar de acordo com a equação 5.8. Para tal consideração é necessário assumir que esta acção ocorre sem que a praia submersa tenha tempo suficiente para se readaptar a tal fenómeno de sobrelevação, o que é possível acontecer durante tempestades com duração relativamente pequena.

Utilizando um valor de sobrelevação de 1 m, próximo do valor máximo de sobrelevação obtido por Gama *et al.* (1994a) para a costa oeste portuguesa, as alturas críticas modificadas ( $H_{cim}$ ) seriam:

$$H_{c1m} \approx 4.1 \text{ m (barra externa);}$$

$$H_{c2m} \approx 2.2 \text{ m (barra interna);}$$

o que se vai traduzir num aumento da quantidade de energia que consegue ultrapassar as barras e ser transmitida à barra seguinte ou à face da praia. Tendo por base os valores de  $H_c$  calculados, é possível estimar o valor de  $E_{im}$  (energia residual não dissipada em determinada linha de rebentação devido à modificação), através da expressão:

$$E_{im} = E_{cim} - E_{ci} \quad (5.9)$$

onde  $E_{cim}$  é a energia correspondente à onda com altura crítica modificada e  $E_{ci}$  a energia da onda com altura crítica, não modificada.

Para o caso apresentado, a energia residual não dissipada por modificação das alturas críticas seria de  $739 \text{ kJ/m}^2$  e de  $177 \text{ kJ/m}^2$ , respectivamente para a 1ª e 2ª linhas de rebentação, sendo este valor transmitido de forma adicional à próxima rebentação.

Na tabela 5.3. e na figura 5.2. apresenta-se uma estimativa de valores de energia não atenuada por efeito de sobrelevação, recorrendo a este método de cálculo e usando sobrelevações entre 0.6 m e 1.2 m e alturas críticas entre 1 m e 4 m. Estes

valores foram seleccionados por se considerarem representativos de condições possíveis para a costa oeste portuguesa e, em particular, para a zona de estudo.

Tabela 5.3. Valores de  $E_{in}$  ( $\text{kJ/m}^2$ ) para diferentes condições de sobrelevação (S) e de alturas de rebentação críticas ( $H_{bi}$ ).

S (m)	$H_{bi}$ (m)			
	1	2	3	4
0.6	48.8	158.4	331.1	567.0
0.8	72.8	223.7	457.8	775.3
1.0	103.9	302.1	605.0	1012.8
1.2	141.2	390.0	765.3	1266.8

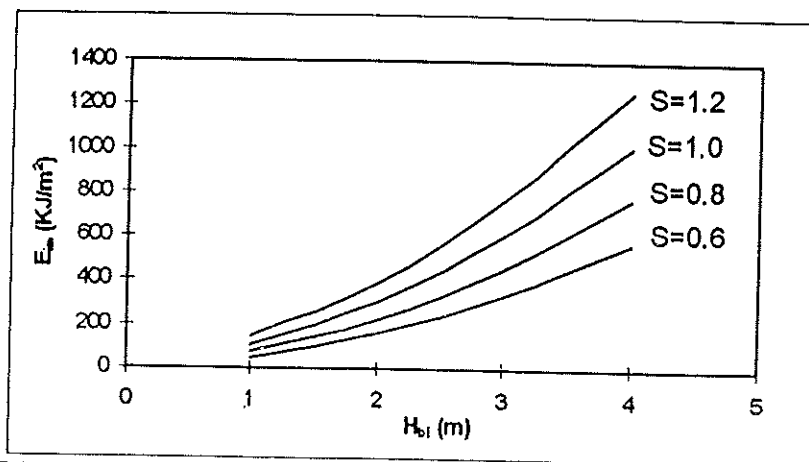


Figura 5.2. Relação entre a altura crítica ( $H_{bi}$ ) e a energia residual não dissipada ( $E_{in}$ ), para diferentes valores de sobrelevação (S).

A figura 5.2. permite ter uma ideia do rápido aumento em energia não dissipada com o aumento do nível de sobrelevação, para iguais condições de altura crítica. A sobrelevação do nível do mar terá ainda efeitos no comportamento geral da energia dissipada por cada praia submersa, relativamente à globalidade das alturas de ondas incidentes, isto é, será responsável por uma alteração na equação 5.6, alteração essa que se traduzirá numa menor capacidade de dissipação de energia. Para os dados de Tocha 92 e admitindo que: i) a taxa de dissipação de energia relativa ( $T_{D1,3}$ ) obtida para a altura crítica ( $H_{bi} = 3.25$  m;  $\Lambda = 0.5$ ) será igual ao valor de dissipação de energia relativa para a altura crítica modificada ( $H_{bi,m} = 4.0$  m;  $\Lambda = 0.615$ ), após sobrelevação de 1 m; e ii) a barra não possuiu tempo suficiente para se readaptar às condições de sobrelevação, o ajuste obrigará a transitar para a equação:

$$T_{D1,3} = 1 - 0.0032(1/\Lambda)^3 \quad (5.10)$$

Assumindo que esta equação é válida para os restantes valores de  $H_{b1}$ , pode construir-se uma curva modificada para a dissipação relativa de energia (figura 5.3.). Utilizando a equação 5.10, uma onda de 2 m ( $\Lambda = 0.31$ ), que em condições normais possuía uma atenuação de 94.3%, passará a ser atenuada em apenas 89.3%, enquanto que uma onda de 4 m ( $\Lambda = 0.615$ ), com amortecimento inicial de 99.3%, passará a ter um amortecimento de 98.6%, o que se traduz numa maior incidência de energia sobre a barra seguinte e sobre a face da praia e, conseqüentemente, numa maior possibilidade de ocorrer erosão. É de notar que uma diminuição percentual, ainda que pequena, poderá corresponder a um valor energético elevado, eventualmente suficiente para exceder o limiar entre a ocorrência ou não de erosão dunar.

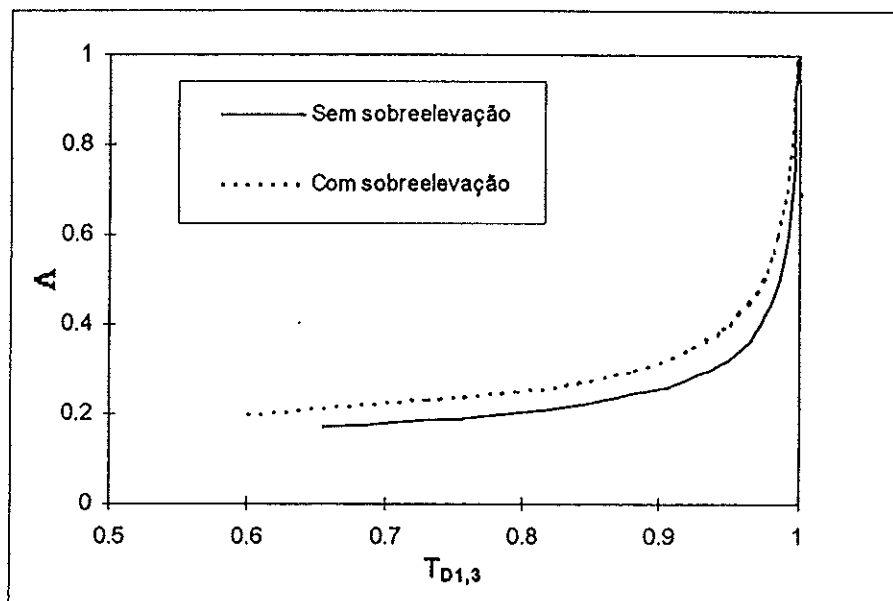


Figura 5.3. Comparação entre o comportamento das curvas de dissipação relativa de energia com e sem sobre-elevação.

Na figura 5.3. observa-se que à medida que a altura da onda vai aumentando, a diferença na taxa de energia relativa dissipada vai diminuindo, ainda que tal não se traduza numa diminuição na energia absoluta.

Com o decorrer do temporal, é normal que a morfologia das praias submersas e das barras em particular sofra ajustamentos, no sentido de estabelecer condições que permitam uma melhor dissipação da energia incidente, pelo que as diferenças mencionadas deverão diminuir com o tempo, desde que a robustez das barras seja suficiente para que se verifique o reajustamento. Em praias submersas onde o volume arenoso das barras parece estar diminuído, como é o caso da parte norte do troço Aveiro - Cabo Mondego (Ferreira, 1993), este efeito de compensação poderá não

ocorrer ou ser menor, permitindo uma maior influência da sobrelevação do nível do mar na erosão costeira.

## 5.5. SÍNTESE

A dissipação de energia observada na campanha Tocha 92, entre a primeira e a terceira linhas de rebentação, foi em média de 95.2%. Considerando apenas os conjuntos de ondas com rebentação completa na 1ª linha de rebentação, essa média aumenta para os 99.3%, valor idêntico aos obtidos em estudos anteriores e indicativo do papel fundamental das barras na restrição à energia das ondas que atingem a face da praia.

Neste estudo foi introduzido o conceito de parâmetro de escala da agitação ( $\Lambda$ ) que comparado com a taxa adimensional de energia relativa dissipada ( $T_{Di,i+x}$ ) permitiu obter, para os dados em estudo, uma relação entre a energia dissipada da primeira para a última rebentação e a altura da onda observada na primeira rebentação, expressa na equação 5.6, com  $a = 0.0017$ . Esta equação e o seu comportamento deverão ser dependentes da morfologia das barras responsáveis pela atenuação da energia. Assim, barras com maior volumetria e, nomeadamente, a menor profundidade, deverão permitir que a progressão de  $T_{Di,i+x}$  para valores próximos de 1 seja mais rápida, denotando maior eficácia das barras. Desta forma, o valor empírico de  $a$  (0.0017 para os dados apresentados) deverá ser menor. Pelo contrário, em áreas onde as barras submersas se encontrem menos desenvolvidas e mais profundas, a progressão de  $T_{Di,i+x}$  para valores próximos de 1 será mais lenta, o que se traduzirá numa readaptação de  $a$  para valores superiores. Esta dependência do coeficiente empírico relativamente à morfologia das barras terá, ainda, de ser testada e verificada com dados de campo complementares. Só assim se conseguirá obter a variação do comportamento da dissipação de energia em função da morfologia das barras.

Caso ocorra uma sobrelevação do nível do mar, existirá também um aumento da coluna de água sobre as barras. Enquanto não se produzir uma readaptação do formato da barra às novas condições a energia dissipada será menor, resultando numa maior incidência das ondas sobre a face da praia. Utilizando as equações 5.8 e 5.9 é possível calcular a energia não dissipada por existência de sobrelevação do nível do

mar, tendo por base a altura crítica de rebentação sobre barras. É ainda possível reformular a equação 5.6, em função da variação da taxa de dissipação de energia relativa causada por determinada sobrelevação, caracterizando o efeito potenciador de erosão que lhe está associado.

Em praias com barras submersas, onde estas possuam papel fundamental como primeiro agente responsável pela dissipação de energia e protecção da praia emersa, a intervenção sobre o sistema como forma minimizadora da erosão poderá passar por uma actuação directa sobre as barras, através da sua regeneração (Boczar-Karakiewicz *et al.*, 1993; Ferreira *et al.*, 1994). Caso seja possível proceder a um controle dimensional das barras submersas, em determinado sector, analisando igualmente a variação das taxas de dissipação de energia ao longo desse sector, tornar-se-á possível intervir em locais onde a taxa de dissipação seja consistentemente menor, repondo valores mais elevados e concordantes com os envolventes, através de realimentações artificiais.

A utilização de formulações semelhantes à equação 5.6, adaptadas a cada troço costeiro específico, poderá possibilitar uma monitorização contínua do comportamento das barras, bem como, determinar quando se estará a atingir situações de degradação, sendo necessário a intervenção no sistema.

## 6. MEDIÇÃO E PREVISÃO DE NÍVEIS DE “RUNUP”

### 6.1. INTRODUÇÃO E CONCEITOS TEÓRICOS

A determinação dos níveis atingidos pelo “runup” em praias naturais é essencial para prever os limites máximos de actuação das ondas, podendo ser utilizados para saber onde ocorrerão escarpas causadas por acção de temporais (Komar *et al.*, 1996), para definir linhas máximas de actuação, para o desenho de estruturas, para a melhoria de modelos de erosão, para apoiar políticas de ordenamento e de gestão e para estimar a ocorrência de inundações associadas a galgamentos (Holman e Sallenger, 1985; Douglass, 1992). Um conhecimento quantitativo da dinâmica do “runup” é ainda essencial para efectuar previsões do transporte sedimentar e para estabelecer os limites em terra, até aos quais se efectua o transporte perpendicular à praia (Kobayashi *et al.*, 1988; Kobayashi e Wurjanto, 1992).

Como já foi referido em 2.5., o conceito de “runup” utilizado neste trabalho é similar ao exposto por Guza e Thornton (1982), de acordo com os quais o “runup” pode ser subdividido em duas componentes: a elevação do nível médio estático da água relativamente ao nível da maré (“setup”) e o espraio (“swash”).

O escasso número de trabalhos de campo sobre o comportamento do “runup” em praias reflectivas, com barras arenosas submersas, em situações de meso ou macromaré, com energia moderada a elevada, originou o estudo que se apresenta neste capítulo.

Os resultados obtidos serão apenas comparados com estudos efectuados em praias reflectivas, visto que o comportamento do “runup” em praias com pendor pouco elevado é distinto, devido ao predomínio de dissipação de energia em situações de rebentação progressiva, constante ao longo de zonas de rebentação extensas. Por esta razão, alguns trabalhos significativos sobre “runup” (e.g. Sonu *et al.*, 1974; Guza e Thornton, 1982; Kobayashi e Wurjanto, 1992; Raubenheimer *et al.*, 1995; Holland *et al.*, 1995), mas efectuados em condições distintas das analisadas nesta dissertação, foram excluídos da revisão de estudos prévios que se apresenta em seguida, bem como do sub-capítulo respeitante à análise e discussão. A existência de relativamente poucos estudos com uma quantidade apreciável de dados de campo levou a que se analisassem alguns trabalhos efectuados quase exclusivamente em laboratório, inclusive com ondas

monocromáticas, ainda que o “runup” produzido por este tipo de ondas possa ser genericamente inferior ao das ondas irregulares. Tal acontece devido à elevação da crista (empolamento) das ondas irregulares na aproximação à costa e por interação das ondas com o fluxo de retorno (ressaca) dos espreios anteriores, causando a possibilidade de ocorrência de “runups” extraordinariamente elevados (Ahrens, 1975).

## 6.2. ESTUDOS PRÉVIOS

Os estudos sobre “runup” iniciaram-se na década de 50, através de experiências laboratoriais de pequena escala, com ondas monocromáticas. No entanto, resultados de estudos sistemáticos em praias naturais foram apenas conhecidos na década de 80. Recentemente, Walton (1993) elaborou um resumo dos estudos existentes sobre este assunto, concluindo que os dados de “runup” em praias naturais são ainda escassos e que vários autores referem a existência de larga dispersão nos valores obtidos, o que dificulta a generalização das conclusões obtidas.

A primeira fórmula empírica e simples para a determinação do nível máximo de “runup” ( $R_{max}$ ) foi indicada por Hunt (1959) através de estudos em laboratório. Essa fórmula relacionava o máximo “runup” ( $R_{max}$ ) com o pendore da praia ( $\tan\beta$ ), a altura da onda ao largo ( $H_o$ ) e o comprimento da onda ao largo ( $L_o$ ), através da expressão:

$$R_{max}/H_o = (2.3 \tan\beta)/(H_o/T^2)^{0.5} \quad (6.1)$$

A fórmula apresentada foi posteriormente rescrita por Battjes (1971) sob a forma:

$$R_{max} = (H_o L_o)^{0.5} \tan\beta \quad (6.2)$$

Admitindo  $L_o = 1.56T^2$ , a expressão de Hunt seria transformada numa equação similar a 6.2, na forma:

$$R_{max} = 1.84(H_o L_o)^{0.5} \tan\beta \quad (6.3)$$

No entanto, a formulação de Hunt foi determinada para estruturas impermeáveis de pendur fixo (0.1), em laboratório, com possíveis problemas de escala (Hunt, 1959), não tendo o valor empírico de 1.84 sido corroborado por outros autores (ex.: Nielsen e Hanslow, 1991). A expressão de Battjes é apoiada por numerosos estudos experimentais (sobretudo laboratoriais) em estruturas permeáveis, estando a sua validade restrita a praias com pendores relativamente elevados, onde a dissipação de energia por rebentação progressiva, afastada da linha de costa, é insignificante (Nielsen e Hanslow, 1991).

Holman e Sallenger (1985) efectuaram medições de “runup” numa praia de Duck, Carolina do Norte (EUA), constituída por areia bimodal (moda principal a 0.25 mm misturada com conchas de 0.75 mm), possuindo pendur médio de 0.1 (variável entre 0.07 e 0.2, Holman, 1986) e com uma barra submersa localizada a aproximadamente 50 m da linha de costa. Os autores consideram não ser óbvia a escolha de um pendur apropriado mas que a utilização do pendur da baixa praia (“foreshore”) permite a redução da dispersão nos dados para os valores obtidos durante a maré alta ou a meia maré. As alturas significativas das ondas incidentes variaram entre 0.4 m e 4.0 m, para períodos entre 6 s e 16 s. Os autores concluíram que o “runup” total ( $R_t$ ) pode ser dado pelas seguintes relações:

$$R_t/H_{s0} \approx 0.80\xi_0 \quad \text{em maré alta} \quad (6.4)$$

$$R_t/H_{s0} \approx 0.93\xi_0 \quad \text{em média maré} \quad (6.5)$$

$$R_t/H_{s0} \approx 0.24\xi_0 \quad \text{em maré baixa} \quad (6.6)$$

sendo  $H_{s0}$  a altura significativa em águas profundas e  $\xi_0$  o número de Irribaren [ $\tan\beta/(H_{s0}/L_0)^{0.5}$ ]. Substituindo  $\xi_0$  por  $\tan\beta/(H_{s0}/L_0)^{0.5}$  e resolvendo a equação em função de  $R_t$ , obtém-se a relação:

$$R_t = c(H_{s0}L_0)^{0.5}\tan\beta \quad (6.7)$$

tomando  $c$  os valores mencionados para as equações 6.4 a 6.6, de acordo com a

situação descrita.

Foram identificados valores de “runup” total mais baixos em maré baixa do que em meia maré ou em maré alta, para iguais condições de agitação ao largo, o que pode ser explicado pelo verificado aumento da rebentação sobre a barra submersa, durante a maré baixa. Por esta razão, os autores mencionam que para a maior parte das condições, o pendor da baixa praia (ou da face da praia) é o mais relevante para o cálculo de  $\xi_0$ , mas que em maré baixa a barra submersa pode ser igualmente importante. Durante o trabalho, Holman e Sallenger (1985) procederam a uma separação das bandas gravíticas e infragravíticas do espraio, a uma frequência limite de 0.05 Hz, concluindo que há um domínio da banda infragravítica em condições de  $\xi_0 < 1.75$ , associado a tempestades. Os autores fizeram, ainda, uma análise da variabilidade longilitoral dos resultados, usando 7 a 9 locais de medição, ao longo da praia. Os resultados mostram que de entre os componentes do “runup”, o “setup” tem maior variabilidade do que a altura de espraio, possuindo valores de desvio padrão superiores. Esta variação não foi aleatória, evidenciando padrões longilitorais com nodos e antinodos que poderiam estar relacionados com “edge waves”.

Holman (1986) reavaliou o mesmo conjunto de dados utilizado por Holman e Sallenger (1985), obtendo valores de “runup” relativos ao percentil 2 ( $R_2$ ), isto é, determinou os níveis excedidos apenas por 2% do espectro. Para a previsão desses níveis recorreu a uma expressão do tipo:

$$R/H_{s0} = c\xi_0 \quad (6.8)$$

semelhante às já utilizadas por Holman e Sallenger (1985), onde  $c$  é um valor empírico. Para  $R_2$ , Holman determinou que  $c = 0.83$ .

Nielsen e Hanslow (1991) analisaram os dados de 6 locais da costa de New South Wales, Austrália, representando um conjunto vasto de tipos de praias naturais, possuindo desde perfis reflectivos com pendores elevados até praias dissipativas de pequeno declive. Os autores consideraram que a demarcação entre praias com declive suave e acentuado acontece para um valor de  $\tan\beta = 0.1$ , pelo que estudaram separadamente as praias pertencentes aos dois conjuntos. Os valores utilizados, relativos à altura média quadrática de ondas ao largo ( $H_{rms0}$ ), variaram entre 0.53 m e

3.76 m, para períodos significativos ( $T_s$ ) entre 6.4 s e 11.5 s. Apesar das praias analisadas possuírem sistemas de barra-cava, nenhum estudo específico foi efectuado pelos autores com vista à determinação da influência das barras nessas praias, relativamente aos valores de “runup”. Os valores de “runup” foram relacionados com a escala vertical da distribuição do “runup” ( $L_r$ ), que é dada por:

$$L_r \approx 0.6(H_{rmso}L_o)^{0.5}\tan\beta \quad \text{para } \tan\beta \geq 0.1 \quad (6.9)$$

As relações determinadas pelos autores entre  $L_r$  e os valores de “runup”, para praias com declive acentuado, estão genericamente de acordo com as propostas por Holman (1986). Nielsen e Hanslow (1991) propõem que se utilize uma relação do tipo:

$$R = cL_r \quad (6.10)$$

equivalente a:

$$R = c(H_{rmso}L_o)^{0.5}\tan\beta \quad (6.11)$$

onde  $c$  é determinado empiricamente. Para  $\bar{R}$  (média dos “runups” medidos),  $\bar{c} \approx 0.6$ ; para  $R_s$  (“runup” significativo),  $c_s \approx 0.85$ ; e para  $R_1$  (nível excedido por apenas 1% das ocorrências),  $c_1 \approx 1.3$ . Admitindo uma distribuição de Rayleigh para a agitação incidente, a relação entre a altura significativa e a altura média quadrática, ao largo, é expressa por  $H_{s0} = 1.41H_{rmso}$  ou  $H_{rmso} = 0.71H_{s0}$ . Substituindo  $H_{rmso}$  por  $H_{s0}$  na equação 6.9, os valores de  $c$  passam a ser  $\bar{c} \approx 0.45$ ,  $c_s \approx 0.72$  e  $c_1 \approx 1.09$ . Para  $R_1$ , a expressão obtida é semelhante à inicialmente proposta por Battjes (1971), onde  $c = 1$ . De acordo com uma reanálise dos dados de Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991) consideram que o valor de  $c_2$ , relativo a  $R_2$ , é igual a 0.90, relativamente próximo dos 0.83 propostos por Holman (1986). Numa análise posterior dos dados de Holman (1986), Douglass (1992) conclui que o “runup” pode ainda ser expresso por:

$$R/H_{s0} = c'/(H_{s0}/L_o)^{0.5} \quad (6.12)$$

sendo  $c' = 0.12$  para os níveis extremos de “runup” ( $R_{max}$ ). Esta equação, se resolvida em função de  $R$ , pode ser expressa sob a forma  $R = c'(H_{so}L_o)^{0.5}$ , semelhante às anteriores mas sem a inclusão do pendor. O valor de  $c' = 0.12$  equivale a usar valores de  $c$  entre 0.8 e 1.1, para pendores de face da praia entre 0.15 e 0.11, visto que  $c' = c \tan \beta$ . Douglass (1992) sugere a omissão do termo relativo ao pendor nas formulações para previsão de “runup” em praias, visto não ter sido encontrada correlação entre o “runup” e o pendor nos dados de Holman (1986). Contudo, é necessário referir que esse conjunto de dados foi obtido para uma única praia, com pendor médio próximo de 0.1 e com variações entre 0.07 e 0.2. Desta forma, não se observaram condições de praia com declive pouco acentuado, pelo que a influência do pendor no conjunto de dados obtidos poderá ter sido restrita. Uma generalização como a proposta por Douglass (1992) não está de acordo com o apontado por vários autores (ex.: Holman e Sallenger, 1985; Holman, 1986; Carter, 1988; Nielsen e Hanslow, 1991; Raubenheimer *et al.*, 1995) que relacionam distintos comportamentos na distribuição de níveis de “runup” com diferentes pendores de praia, nomeadamente através da separação de praias com baixo e com elevado gradiente.

Hughes (1992) efectuou um estudo com base em ensaios de campo onde concluiu que a máxima altura de espraio é directamente proporcional ao quadrado da velocidade inicial do espraio na linha de costa. Refere, ainda, que a infiltração da água na praia leva a uma redução da altura do espraio para cerca de 65% do previsto em teoria, pelo que as observações efectuadas em estruturas impermeáveis não devem ser utilizadas para caracterizar o “runup” em praias naturais.

Recentemente, Mayer e Kriebel (1994) produziram uma série de experiências de “runup” em laboratório, para ondas regulares e irregulares em pendores não lineares (bi-linear e de equilíbrio-côncavo). Os autores referem que os valores de “runup” medidos foram substancialmente inferiores aos previstos pela fórmula de Hunt, utilizando o pendor da face da praia. Do estudo efectuado resultou um método integrado para previsão de “runup” que utiliza uma complexa solução analítica de uma equação quadrática de difícil interpretação (Mayer e Kriebel, 1994). Os autores decidiram, por esta razão, adoptar um método integrado alternativo, expresso por:

$$R = (H_o L_o)^{0.5} (2 \tan \beta \tan \beta') / (\tan \beta + \tan \beta') \quad (6.13)$$

onde  $\tan\beta$  se refere apenas ao declive da zona emersa e  $\tan\beta'$  ao declive da praia submersa. A equação proposta é semelhante à de Hunt, substituindo  $\tan\beta$  por um declive global da praia que integra a praia submersa. Como o declive desta porção da praia é globalmente inferior a  $\tan\beta$ , o resultado de R calculado desta forma será também inferior ao determinado pela formulação de Hunt (1959). A aplicação desta equação apresenta, no entanto, algumas dificuldades práticas:

i) para ondas irregulares, a medição dos parâmetros necessários (sobretudo  $\tan\beta'$ ) é difícil e complexa (Mayer e Kriebel, 1994), visto que o local de rebentação muda de onda para onda, não sendo possível avaliar a extensão efectiva dessa zona;

ii) a equação não considera variações na maré, definindo um declive médio de actuação que não é realista, visto que na maré baixa o declive mais influente será o da praia submersa, mas em maré alta será, sobretudo, o da face da praia. Desta forma, o método poderá prever adequadamente valores de “runup” médio, mas não permitirá estimar valores de “runup” máximo, em maré alta. Os próprios autores referem que o método deverá ser aplicado a condições médias;

iii) o método não distingue praias reflectivas de intermédias ou dissipativas, onde os processos são distintos, integrando todas as previsões numa mesma fórmula.

Conjuntamente com os factores referidos, há que mencionar que os autores não promoveram qualquer estudo de campo, não validando o método. Mayer e Kriebel (1994) referem, ainda, que para condições de “nível elevado” (maré alta) os níveis medidos e previstos pela fórmula de Hunt, integrando o declive da face da praia, são muito mais próximos do que nas restantes condições.

Utilizando os valores de declives médios para a área em estudo ( $\tan\beta \approx 0.09$  e  $\tan\beta' \approx 0.01$ ), obtém-se uma relação geral semelhante à proposta por Douglass (1992), cuja equação será:

$$R = 0.018 (H_o L_o)^{0.5} \quad (6.14)$$

mas com um valor de c muito inferior. Para condições de tempestade ( $H_o = 5$  m;  $T = 15$  s), o valor de “runup” médio calculado seria de 0.9 m. Este valor é notoriamente inferior ao fornecido pelas restantes previsões, não sendo possível a sua comparação

com níveis extremos, razão pela qual a equação proposta por Mayer e Kriebel (1994) não será testada e comparada no sub-capítulo seguinte.

Baldock *et al.* (1997) estudaram a associação dos movimentos de espraio de baixa frequência (elevado período) relativamente a várias condições e tipos de agitação, tendo concluído que este tipo de movimento é genericamente devido à existência de agrupamento de ondas ("wave grouping"), não sendo relacionável com a presença de ondas estacionárias perpendiculares à linha de costa. Esta conclusão parece sustentar a verificação no campo da existência de picos máximos de "runup" associados a oscilações infragravíticas (baixa frequência), com períodos entre 100 s e 200 s, que foram atribuídos (por observação visual) a interações onda-onda, após propagação sobre as barras submersas. Baldock *et al.* (1997) referem, ainda, que os movimentos de espraio de baixa frequência descrevem o envelope do "runup", podendo ser uma boa aproximação para determinação de eventos singulares. Contudo, não especificam qualquer método de previsão que inclua os movimentos de baixa frequência.

Da revisão exposta ressalta o muito reduzido número de experiências conduzidas em praias reflectivas, verificando-se que todos os autores utilizam derivações da formulação inicial de Hunt (1959), para calcular o valor do "runup". Regista-se que nenhum dos artigos analisados clarifica o papel das barras submersas no comportamento do "runup". Holman e Sallenger (1985) são os únicos autores que referem a importância da barra externa para o cálculo de  $\xi_0$  e, conseqüentemente, do "runup" induzido pelas ondas, sobretudo durante a maré baixa, quando a actividade da barra é mais notória.

### 6.3. RESULTADOS

Foram efectuadas medições em duas campanhas (Tocha 92 e Areão 95), adoptando métodos iguais. As praias observadas apresentaram face da praia reflectiva e praia submersa com barras, com comportamento intermédio a dissipativo. De forma genérica, pode considerar-se que o comportamento morfodinâmico da face da praia foi semelhante nas duas experiências, pelo que os valores do "runup" são comparáveis entre campanhas. A diferença principal entre experiências verificou-se nas condições

de agitação, permitindo uma comparação do comportamento do “runup” sob condições de energia moderada a elevada, com e sem rebentação em barras submersas.

### Tocha 92

Durante esta campanha obtiveram-se sete séries de níveis de “runup”. As condições da face da praia foram geralmente reflectivas, com pendores entre 0.05 e 0.14, sendo geralmente próximos ou superiores a 0.1 (tabela 6.1.). As barras submersas externa e interna estiveram constantemente presentes, induzindo rebentação sobre a crista, seguida de reformação na cava. Durante a maré alta, a rebentação dominante foi do tipo mergulhante, ainda que sobre a barra externa ocorresse rebentação progressiva, para ondas com maior altura. Durante a maré baixa, a rebentação progressiva tornava-se dominante, excepto sobre a face da praia onde havia domínio da rebentação mergulhante. A crista da barra interna estava localizada a uma distância estimada de 50 m a 75 m da posição da linha de costa em maré alta, enquanto que a crista da barra externa se localizava a mais de 250 m. De acordo com os levantamentos batimétricos do Instituto Hidrográfico, efectuados em 1987 e em 1990 (em colaboração com o Grupo DISEPLA), a barra interna na zona envolvente de Palheiros da Tocha pode ter alturas de 1-2 m e largura de 75 m a 100 m, enquanto que a barra externa pode possuir 4-5 m de altura por 350-400 m de largura (Ferreira, 1993; Ferreira *et al.*, 1994). Na figura 6.1. apresenta-se um perfil tipo de praia emersa e submersa, incluindo barra interna e barra externa, para Palheiros da Tocha.

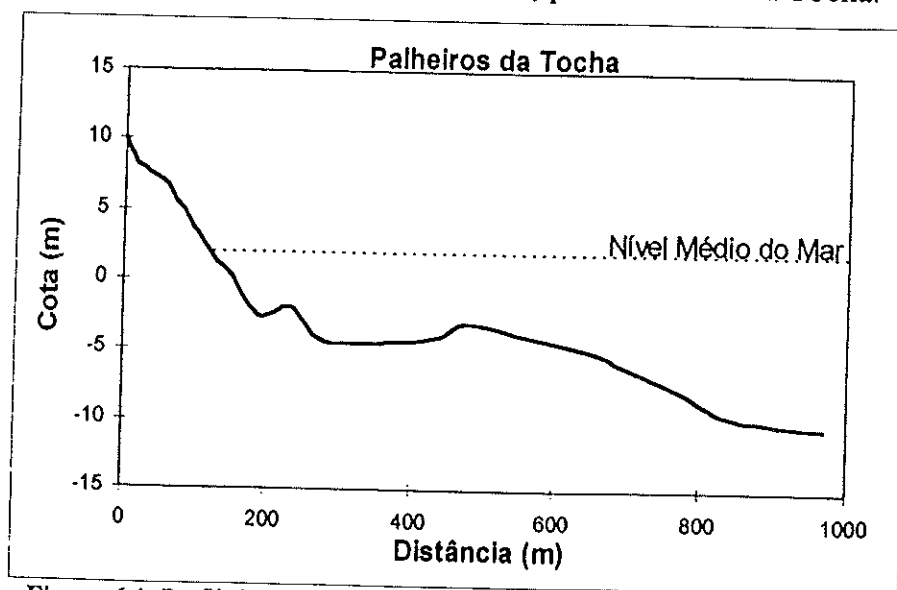


Figura 6.1. Perfil tipo da praia emersa e submersa em Palheiros da Tocha.

Os dados de agitação ao largo foram registados através de uma bóia-ondógrafo localizada ao largo da Figueira da Foz, num local com profundidade de 92 m (Instituto Hidrográfico, 1993). A altura significativa ao largo variou entre 1.43 m e 4.42 m, para os dias da experiência em que se efectuaram registos de “runup” (tabela 6.1.).

### *Areão 95*

Na campanha Areão 95 obtiveram-se seis séries de registos de níveis de “runup”. A face da praia apresentou, durante os levantamentos, um pendor variável entre 0.12 e 0.16 (tabela 6.1.) e um comportamento genericamente reflectivo. Esteve sempre presente uma barra externa, sendo evidenciada na maré baixa pela ocorrência de uma linha de rebentação localizada a cerca de 150-200 m da linha de costa, enquanto que a segunda linha de rebentação ocorria directamente sobre a face da praia, após reformação. Desta forma, aparentemente não existia barra submersa interna, entre a barra externa (1ª linha de rebentação) e a face da praia. A existência de uma berma bem desenvolvida na praia emersa poderá ser igualmente uma evidência da não ocorrência de barra interna, por adesão total à praia. Na figura 6.2. apresenta-se um perfil tipo para a Praia do Areão, englobando praia submersa e emersa.

Na maré baixa alternavam as condições de rebentação progressiva e mergulhante, enquanto que durante a medição dos níveis de “runup”, em maré alta, apenas existia uma linha de rebentação evidente, sobre a face da praia, sendo a rebentação mergulhante largamente dominante.

A bóia-ondógrafo de Aveiro não esteve em funcionamento no decorrer desta experiência, sendo apenas possível obter dados de agitação relativos à bóia de Sines, localizada igualmente na costa oeste portuguesa, mas a cerca de 280 km a sul da praia estudada. Esta bóia encontra-se num local com cerca de 54 m de profundidade e os seus dados são tomados como representativos do regime de agitação ao largo, na área da experiência, para os dias analisados, por falta de dados com localização mais próxima. Os valores de altura significativa ao largo registados na bóia de Sines variaram entre 1.03 m e 1.90 m, durante as seis séries de níveis obtidos.

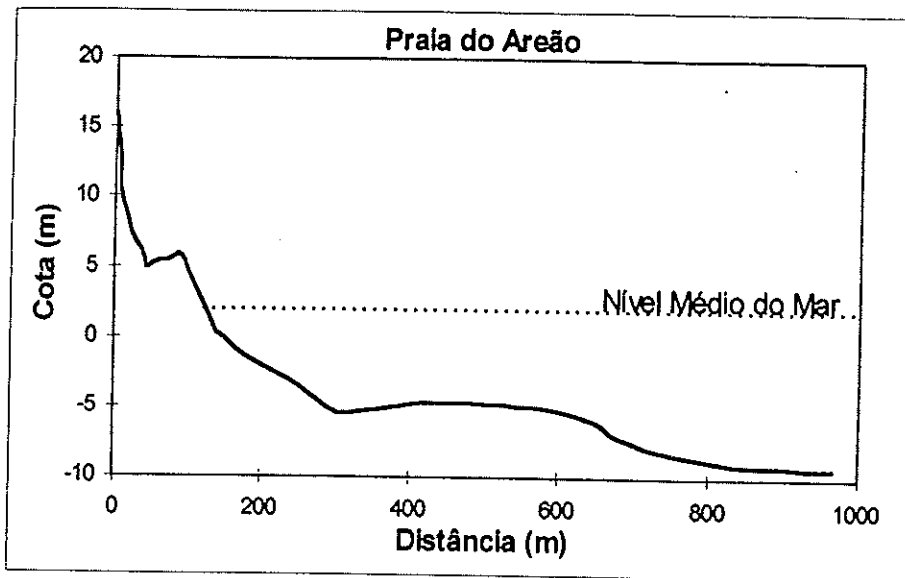


Figura 6.2. Perfil tipo da praia emersa e submersa para Praia do Areão.

Para a totalidade das 13 séries de 20 minutos, foram determinados os níveis de  $R_{max}$  ("runup" máximo),  $R_s$  ("runup" significativo) e  $\bar{R}$  ("runup" médio). Os valores obtidos são apresentados na tabela 6.1., conjuntamente com os pendores da face da praia, com as alturas significativas da onda em águas profundas e com os períodos de pico ao largo.

Tabela 6.1. Valores de pendor de praia, altura de onda significativa e período de pico ao largo e níveis máximos, significativos e médios de "runup".

Campanha/Dia	$\tan\beta$	$H_{so}$ (m)	$T_p$ (s)	$R_{max}$ (m)	$R_s$ (m)	$\bar{R}$ (m)
<b>Tocha 92</b>						
28/11/92	0.14	2.04	13.0	2.53	1.95	1.45
29/11/92	0.11	2.21	13.0	2.70	2.21	1.65
01/12/92	0.12	3.95	15.0	2.69	2.32	1.61
05/12/92	0.10	4.42	12.5	2.73	2.00	1.43
06/12/92	0.11	2.76	12.0	2.29	1.60	1.23
11/12/92	0.09	2.37	13.4	2.09	1.67	1.27
13/12/92	0.05	1.43	11.8	1.80	1.54	1.29
<b>Areão 95</b>						
11/04/95	0.14	1.27	11.8	2.21	1.68	1.12
12/04/95	0.14	1.90	13.3	2.72	1.95	1.34
13/04/95	0.16	1.53	12.5	2.20	1.46	0.97
14/04/95	0.14	1.10	11.8	2.27	1.69	1.13
15/04/95	0.12	1.03	10.5	1.46	0.98	0.73
17/04/95	0.16	0.92	11.1	1.89	1.16	0.83

Numa análise breve da tabela é possível ver que foi registado um leque abrangente de alturas, desde energia moderada a elevada, com as maiores alturas a serem registadas na campanha Tocha 92. Contudo, os níveis máximos atingidos ( $R_{max}$ ) não apresentam uma relação entre campanhas correspondente à das alturas, sendo os

níveis máximos obtidos em Tocha 92 relativamente próximos dos registados em Areão 95, ainda que as diferenças em alturas de ondas possam ultrapassar os 3 m.

## 6.4. DISCUSSÃO

### 6.4.1. Distribuição dos níveis de "runup"

As várias séries obtidas foram analisadas do ponto de vista da distribuição dos valores, obtendo-se as razões  $R_s / \bar{R}$  e  $R_{\max} / \bar{R}$ , expressas na tabela 6.2..

**Tabela 6.2.** Relações entre os vários níveis de "runup" determinados.

Razão	Tocha 92	Areão 95	Rayleigh
$R_s / \bar{R}$	1.34	1.46	1.60
$R_{\max} / \bar{R}$	1.69	2.09	2.43*

\* Neste caso  $R_{\max}$  foi substituído por  $R_1$ .

As razões obtidas para as campanhas Tocha 92 e Areão 95 são genericamente inferiores às consideradas por Ahrens (1977) e por Nielsen e Hanslow (1991), onde uma distribuição de Rayleigh é assumida e utilizada. Tal disparidade é sobretudo observada nos dados de Tocha 92 e para a razão  $R_{\max} / \bar{R}$ . Os menores valores nas relações, para Tocha 92, em cerca de 20% relativamente a Areão 95, indicam uma menor dispersão dos valores máximos relativamente à média. Esta redução poderá ser explicada pela acção atenuadora das barras activas na campanha em causa, o que não se registou em Areão, na maré alta. Este facto indica, ainda, que em locais onde ocorre importante atenuação de energia sobre as barras, o espectro de níveis de "runup" na face da praia poderá estar encurtado ou truncado, não sendo os valores de  $R_{\max}$  tão elevados quanto o previsto.

Ahrens (1977) refere que a distribuição por ele obtida é conservativa, prevendo máximos de "runup" demasiado elevados relativamente aos observados. O autor menciona que em situações onde as ondas maiores rebentam ao largo, as elevações previstas pelas relações apresentadas se tornam ainda mais conservativas. De uma forma simples, o autor prevê que o "runup" máximo não deverá exceder níveis superiores a 1.4 - 1.5 de  $R_s$ , o que se traduz numa relação  $R_{\max} / \bar{R}$  inferior a 2.2 - 2.4.

Estas afirmações parecem confirmar o que atrás foi expresso, indicando uma distorção e encurtamento do espectro de distribuição do "runup" por efeito de rebentação nas barras.

#### 6.4.2. Previsão dos níveis máximos de "runup"

As fórmulas existentes para a previsão de "runup" em praias naturais com declive acentuado foram aplicadas às condições de agitação e declive obtidas em Tocha 92 e Areão 95, estando os resultados expressos na figura 6.3., onde os valores previstos são comparados com os valores de  $R_{max}$  observados. Para a análise desta figura, é necessário ter em atenção que os valores  $R_t$ ,  $R_1$  e  $R_2$  não representam necessariamente valores iguais a  $R_{max}$ , ainda que se lhe aproximem. Pela observação da figura 6.3. é evidente que os valores de  $R_{max}$  previstos para Tocha 92 pelas diferentes equações empregues (6.2, 6.4, 6.8, 6.11 e 6.12) apresentam grande dispersão entre si, encontrando-se genericamente sobrestimados, resultando o primeiro facto das diferenças entre coeficientes empíricos propostos pelos diversos autores. As equações propostas por Battjes (1971), Nielsen e Hanslow (1991) e Douglass (1992) fornecem uma estimativa genericamente superior às observações, com as diferenças máximas a atingirem mais de 2 m, enquanto que os outros métodos parecem constituir uma melhor aproximação ao observado.

Relativamente aos dados de Areão 95 (figura 6.3.), onde não existiam barras activas e onde apenas se verificava rebentação sobre a face da praia, a dispersão é significativamente menor. As equações parecem ajustar-se de forma mais correcta às observações e, sobretudo, conseguem prever o padrão de comportamento. As equações de Battjes (1971) e de Nielsen e Hanslow (1991) continuam a fornecer uma estimativa superior aos dados de campo, enquanto que as restantes previsões apenas evidenciam uma ligeira subestima.

Da análise da figura 6.3. é ainda possível verificar que os níveis máximos observados nas duas campanhas de campo foram muito próximos entre si, apesar dos máximos valores de alturas de ondas terem diferido em cerca de 2 m, entre distintas campanhas.

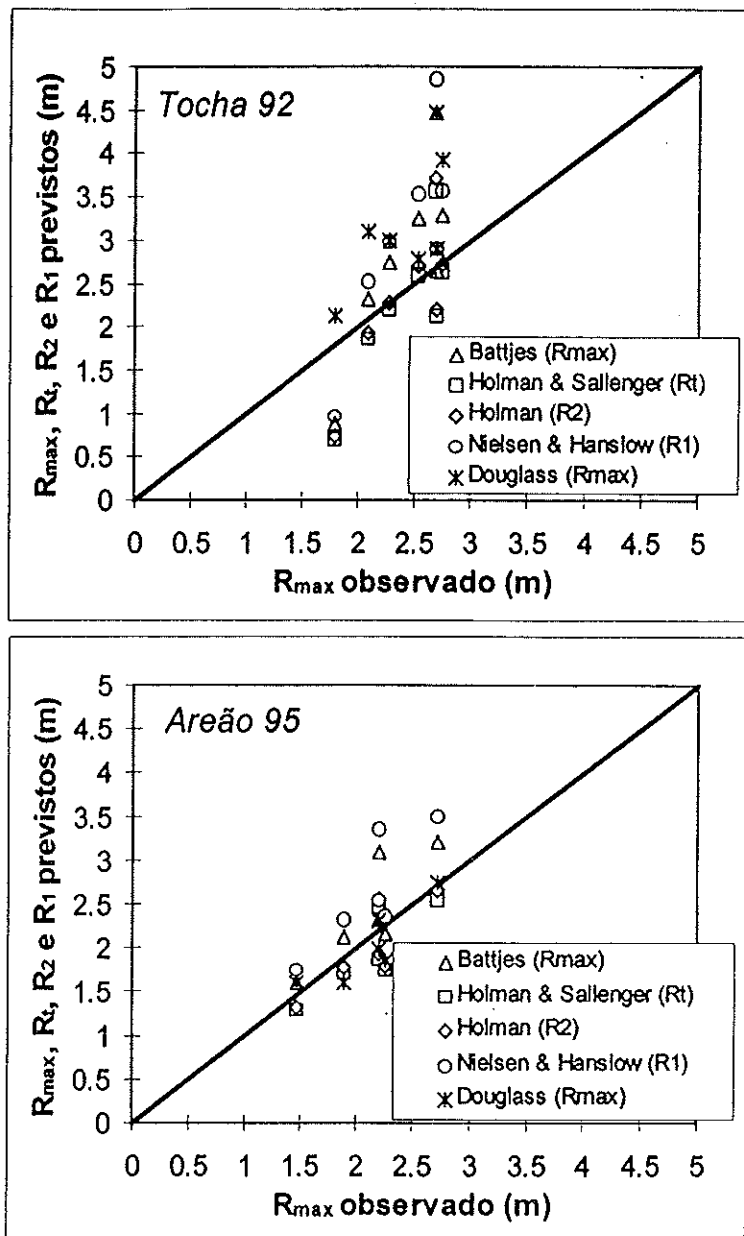


Figura 6.3. Comparação entre os dados de  $R_{max}$  obtidos e previstos por formulações, para Tocha 92 e Areão 95, utilizando  $H_o$ . A linha a negro indica o ajuste perfeito.

Efectuou-se o mesmo tipo de comparação da figura 6.3., mas utilizando as alturas estimadas visualmente para a rebentação sobre a face da praia, em vez de se recorrer às alturas ao largo. No entanto, os níveis previstos foram genericamente inferiores aos observados, especialmente para o caso de Tocha 92 (figura 6.4.). Para os dados desta campanha não foi encontrado qualquer ajuste de comportamentos entre valores previstos e observados, utilizando  $H_{b3}$ , enquanto que para Areão 95 o comportamento parece ser descrito pelas fórmulas utilizadas, ainda que com valores previstos inferiores aos observados. Esta diferença dever-se-á ao efeito de amortecimento das barras submersas na altura da onda, diminuindo os valores de  $H_{b3}$ , sem que a diminuição do "runup" seja efectuada de forma correspondente. Assim,

parece que os parâmetros de agitação na rebentação sobre a face da praia não devem ser correlacionados com os níveis máximos de “runup”, sobretudo para locais onde as barras submersas possuem papel fundamental no processo de dissipação de energia.

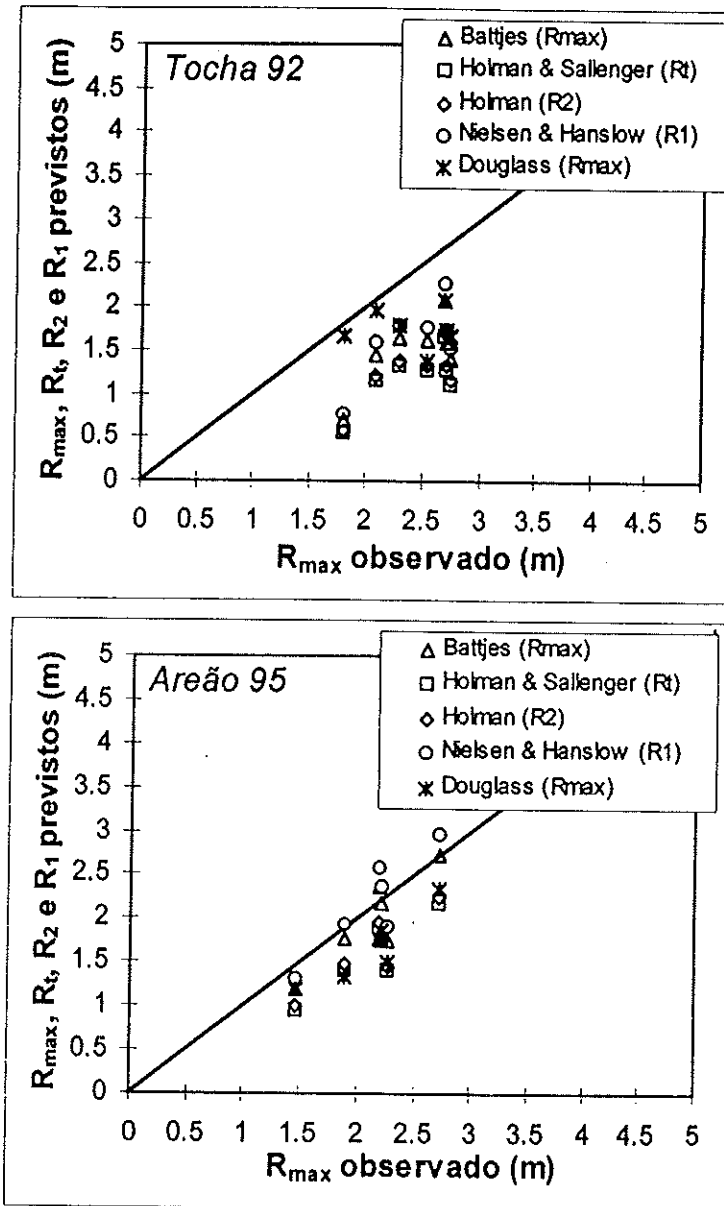


Figura 6.4. Comparação entre os dados de  $R_{max}$  obtidos e previstos por formulações, para Tocha 92 e Areão 95, utilizando  $H_{b3}$ . A linha a negro indica o ajuste perfeito.

Tendo como base os valores de agitação ao largo e as relações expressas pelos vários autores citados anteriormente, efectuaram-se análises conducentes à obtenção de uma forma comum de previsão, aplicável à área em questão. Como tal, as formas de previsão obtidas correspondem a adaptações da formulação inicialmente proposta por Hunt (1959).

Por forma a determinar os valores de  $c$  e  $c'$  mais ajustados aos dados, recorreu-se ao método dos mínimos quadrados, tendo-se obtido os valores de  $c = 0.89$  e de  $c' =$

0.115. O valor de  $c$  está dentro do intervalo definido pelos valores propostos por Battjes, Holman e Sallenger, Holman e Nielsen e Hanslow ( $0.8 < c < 1.09$ ), enquanto que o valor de  $c'$  é praticamente igual ao proposto por Douglass ( $c' = 0.12$ ).

Apesar dos índices parecerem ajustados aos valores propostos na literatura, torna-se necessário verificar da sua real aplicabilidade e ajuste aos dados de campo obtidos, efectuando a sua validação. De forma genérica, a recta definida por  $c = 0.89$  (figura 6.5.a) ajusta-se aos dados de campo, conseguindo prever o seu comportamento. No entanto, a recta definida por  $c' = 0.115$  (figura 6.5.b) não apresenta uma relação semelhante com os dados obtidos, evidenciando um desvio relativamente à tendência de comportamento das observações.

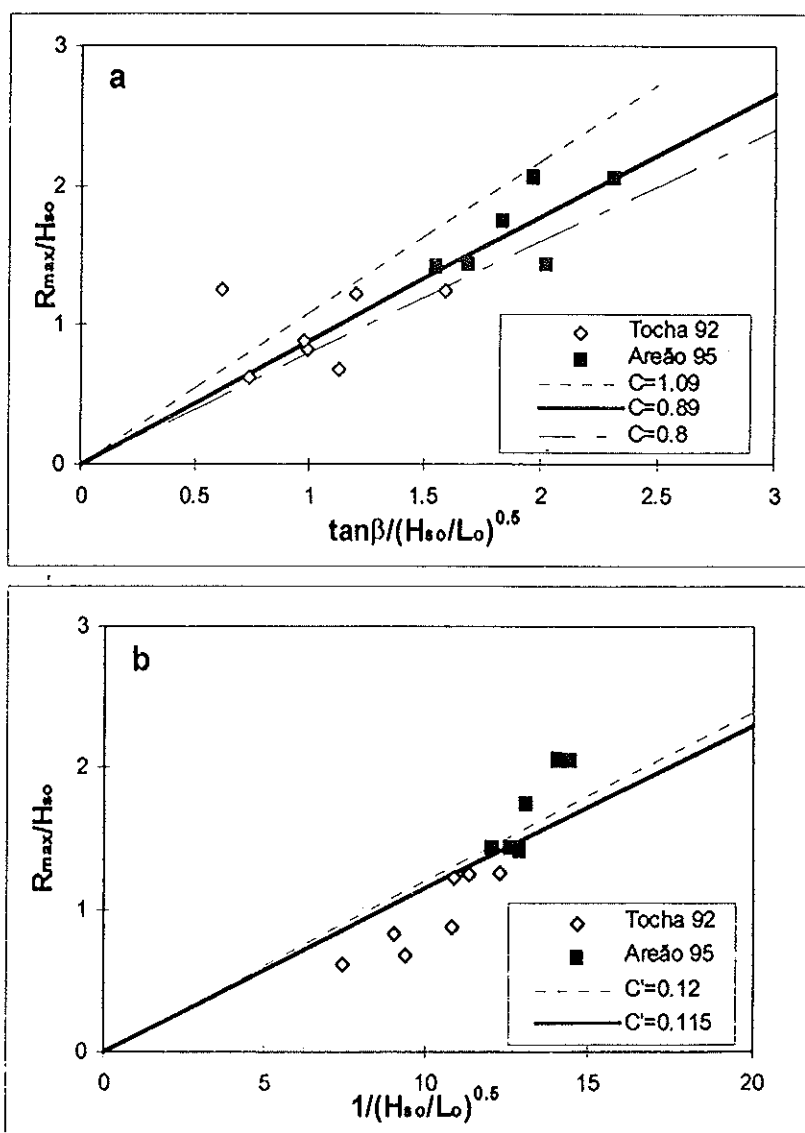


Figura 6.5. Comparação entre os dados e as formulações obtidas. a) determinação de  $c$ ; b) determinação de  $c'$ .

É igualmente notório que a razão  $R_{max}/H_{so}$  apresenta valores genericamente inferiores em Tocha 92 do que em Areão 95, evidenciando o que já atrás se tinha

referido. Isto é, a existência de menores valores relativos de “runup” em Tocha 92, apesar dos maiores valores de agitação ao largo. Este facto poderá ser justificado pelo efeito atenuador das barras e pela dissipação de energia associada ao processo de rebentação.

Dado o relativamente escasso número de dados e a dispersão existente, torna-se necessário proceder a um teste de validação relativamente aos valores máximos previstos. Para tal, utilizaram-se os valores de agitação registados entre a madrugada e a noite do dia 16 de Dezembro de 1992, coincidentes com a ocorrência de um temporal de curta duração (cerca de 12 horas) e com os últimos levantamentos efectuados na campanha Tocha 92.

Durante a máxima maré alta, cerca das 9h do dia 16, a agitação existente possuiu 6.92 m de altura significativa ao largo e um período de pico de 15.4 s. A aplicação das relações:

$$R_{\max} = 0.89(H_{s0}L_0)^{0.5} \tan\beta \quad (6.15)$$

$$R_{\max} = 0.115(H_{s0}L_0)^{0.5} \quad (6.16)$$

permitiu prever níveis máximos de “runup” para estas condições de 3.15/3.60 m (eq. 6.15) e de 5.82 m (eq. 6.16). A variação em  $R_{\max}$  para a equação 6.15 deve-se à utilização de valores de  $\tan\beta$  entre 0.07 e 0.08, correspondentes aos pendores determinados para os perfis do dia 16/12/92. A máxima maré alta atingiu um nível máximo de 3.37 m ZH, registado no marégrafo do porto de Aveiro, na manhã do dia 16, pelo que o “runup” deveria, de acordo com as previsões, atingir cotas entre 6.52/6.97 m ZH e 9.19 m ZH.

Por comparação com os perfis obtidos nos dias 15 e 16 e pelas anotações de campo dos níveis máximos atingidos pelo espraio, observou-se que estes variaram entre 6.86 m ZH e 7.00 m ZH, nos cinco perfis analisados, tendo um valor médio de 6.95 m ZH. Assim, a utilização da equação proposta por Douglass (1992), com eliminação de  $\tan\beta$ , parece desajustada à realidade observada, com uma diferença entre previsão e realidade de 2.0 m a 2.33 m. A previsão obtida pela equação 6.15, baseada na formulação inicial de Hunt, proporciona a obtenção de valores relativamente

correctos, 0.03 m a 0.34 m inferiores aos níveis verificados no campo. Parece, assim, que a utilização dos valores do pendor da face da praia permite obter previsões mais correctas, visto que compensam o aumento das condições de agitação. Na realidade, ao aumento dos valores de agitação ( $H$  e  $T$ ) não deverá corresponder um aumento directo dos níveis máximos de “runup”, visto que a praia responde com uma atenuação da energia incidente e com variações morfológicas importantes, tornando-se mais dissipativa e, conseqüentemente, com pendor da face da praia menor. A inclusão de  $\tan\beta$  permite, assim, contabilizar na formulação a dissipação de energia ocorrente no decurso de temporais, visto que a diminuição do pendor permite que o aumento de  $R_{\max}$  não seja tão elevado quanto o esperado por uma simples relação linear com as características de agitação.

Tomando a relação 6.15 como representativa para o troço costeiro estudado, é possível prever valores de níveis máximos de “runup”, para tempestades com períodos de retorno elevado. Por exemplo, para uma tempestade com período de retorno de 5 anos ( $H_{50}$  com cerca de 10 m, de acordo com Pires e Pessanha, 1986a,b; Ferreira, 1993) e admitindo valores de  $T_p$  entre 15 s e 18 s e de  $\tan\beta$  entre 0.07 e 0.09, os valores de  $R_{\max}$  esperados variam entre 3.7 m e 5.7 m (tabela 6.3.).

**Tabela 6.3.** Valores de  $R_{\max}$  (m) esperados para um temporal com período de retorno de 5 anos ( $H_{50} = 10$  m), para várias condições de período de pico e pendor da face da praia.

$T_p$ (s)	$\tan\beta = 0.09$	$\tan\beta = 0.07$
15	4.75	3.69
18	5.69	4.43

Durante a maré alta (valor médio de maré alta  $\approx 3$  m ZH) o nível absoluto atingido (“runup” + maré) seria de 6.7 m ZH a 8.7 m ZH. Caso o temporal coincidisse com marés vivas, esses níveis poderiam elevar-se aos 7.5 m ZH a 9.5 m ZH, mesmo sem contabilização directa do nível de sobrelevação. Qualquer destes níveis seria suficiente para provocar galgamentos na quase totalidade das bermas existentes na área de estudo, de acordo com as cotas máximas apontadas por Tomás (1995) para a zona costeira considerada.

Na tabela 6.4. apresentam-se os valores mínimos, médios e máximos da cota do topo do cordão dunar.

**Tabela 6.4.** Cotas do topo do cordão dunar, em metros, referidas ao Zero Hidrográfico, entre Costa Nova do Prado e Quiaios (valores obtidos com base nas Cartas Topográficas do Exército, 1: 25 000).

Troço	Mínima	Média	Máxima
C.Nova - Vagueira	7	8.4	10
Vagueira - P. Areão	7	11.6	16
P. Areão - P. Mira	13	14.7	16
P.Mira - C. Marco	12	13.9	15
C. Marco - P. Tocha	13	13.6	16
P. Tocha - Costinha	10	14.8	16
Costinha - Quiaios	11	14.5	15

Verifica-se que um temporal com este período de retorno seria suficiente para causar galgamentos de alguns corpos dunares da área de estudo, nomeadamente em vários locais da zona entre Costa Nova do Prado e Praia do Areão, onde as dunas possuem menor porte e se encontram mais afectadas pela actividade antrópica. É de notar que os valores expressos dizem apenas respeito ao topo do cordão dunar, pelo que não são consideradas as zonas de depressão do próprio cordão (ex. cortes eólicos ou trilhos). Em vários dos troços considerados estas zonas possuem dimensão apreciável, estando sujeitas a galgamento. As cotas apontadas têm por base levantamentos com cerca de 20 anos, não possuindo o cordão dunar, actualmente, valores máximos tão elevados, em alguns locais. Tal deve-se à existência de erosão costeira, responsável pelo desaparecimento da crista do cordão dunar em locais entre costa Nova do Prado e Barra de Mira.

Deve-se ainda realçar que durante um temporal com período de retorno de 5 anos será de esperar a ocorrência de sobrelevação significativa (superior a 0.3 m), com valores máximos que poderão atingir cerca de 1 m, o que se traduziria em duas acções:

- a) diminuição da dissipação de energia por sobrelevação, com possível aumento indirecto dos níveis de “runup”;
- b) aumento directo do “runup” por sobreposição do valor de sobrelevação (“storm surge”) ao nível de “wave setup”.

Desta forma, o nível máximo atingido pelo espraio, nesta situação, poderia ser ainda superior aos valores previstos e apresentados na tabela 6.3.

Por forma a estimar quais os níveis de “runup” associados a temporais com período de retorno entre 1 e 100 anos, determinaram-se esses níveis assumindo um comportamento médio para a área de estudo. De acordo com esse comportamento, a

face da praia possuiria um declive médio entre 0.09 e 0.07, coincidente com o observado em situações de campo durante e após tempestades. Os valores de altura de onda para cada período de retorno foram retirados dos apresentadas em 3.1.3.2., tendo-se adoptado períodos entre 15 s e 18 s, correspondentes aos períodos normalmente associados a tempestades. Os resultados obtidos estão expressos na figura 6.6., verificando-se que o maior incremento de elevação se regista para os períodos de retorno menores, acompanhando o próprio comportamento atribuído à altura da onda. O máximo nível calculado, para um período de retorno de 100 anos, foi de 6.71 m, que associado a uma maré alta média de marés vivas (3.4 m ZH) poderá gerar um nível máximo atingido pelo mar superior a 10 m ZH, sem contabilizar o efeito directo da sobreelevação associada.

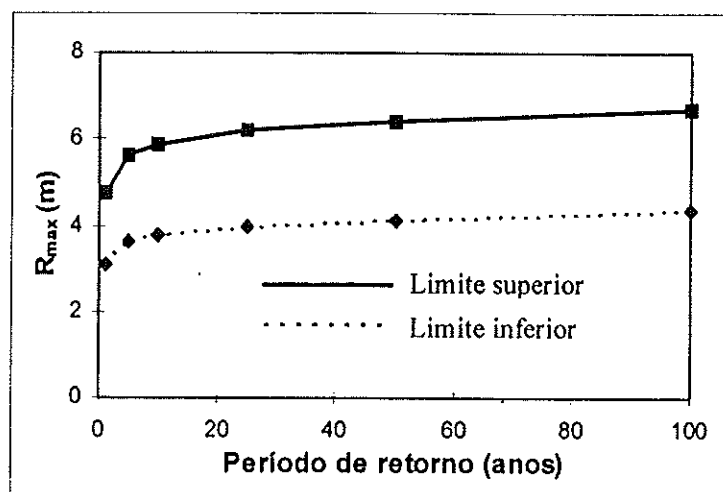


Figura 6.6. Intervalo de variação de níveis máximos de "runup" para tempestades com períodos de retorno entre 1 e 100 anos, admitindo condições médias para a área de estudo.

## 6.5. SÍNTESE

Da comparação dos dados obtidos nas duas campanhas analisadas (Tocha 92 e Areão 95) verifica-se que os picos máximos de "runup" atingidos em Tocha 92 não foram muito superiores aos obtidos em Areão 95, apesar da agitação incidente ter atingido valores mais elevados na primeira campanha. Tal facto é corroborado pela análise de distribuição do "runup", onde se evidencia uma truncatura superior do espectro, que se poderá dever a um efeito atenuador das barras submersas, mais influentes em Tocha 92 do que em Areão 95.

Da análise dos dados ressalta, ainda, a correlação reduzida entre os valores de altura da onda na rebentação sobre a face da praia e os níveis máximos de "runup"

atingidos. Optou-se, por este motivo, por relacionar os níveis obtidos com valores de agitação ao largo, tal como em anteriores trabalhos de outros autores. No entanto, a existência de oscilações de longo período associadas a interacção onda-onda, conjuntamente com a truncatura superior do espectro em praias com barras submersas, podem indicar que esta relação não será directa.

A utilização de uma formulação semelhante à proposta por Hunt e revista por Battjes, com  $c = 0.89$  (equação 6.15), possibilita a previsão de níveis máximos de "runup" para a área em estudo, face ao conhecimento actual e aos dados disponíveis. Os níveis máximos previstos pela equação referida resultam do ajuste a dados obtidos em maré alta, pelo que só deverão ser aplicados nestas condições. A utilização desta formulação, em função da altura de onda prevista para determinados períodos de retorno, permite calcular valores máximos esperados, na área de estudo. Este tipo de aplicação torna-se de elevado interesse no que respeita à gestão da zona costeira, nomeadamente para o dimensionamento de reconstruções dunares, como forma de obviar a existência de galgamentos.

A aplicação da formulação a uma situação de tempestade com período de retorno de 5 anos permitiu evidenciar a relativamente elevada possibilidade de galgamentos na zona entre Costa Nova do Prado e Areão. Aliás, regista-se que a sul da povoação da Vagueira foi já efectuada uma reconstrução dunar, numa área de elevada fragilidade e onde as cotas do topo da duna eram pouco elevadas. De acordo com as previsões efectuadas e para uma altura de onda com período de retorno de 100 anos, serão de esperar níveis máximos de "runup" próximos ou ligeiramente superiores aos 10 m ZH, o que se traduziria no galgamento de vários quilómetros de dunas ao longo da área de estudo, bem como, na possível danificação de algumas edificações e estruturas existentes junto ao campo dunar.

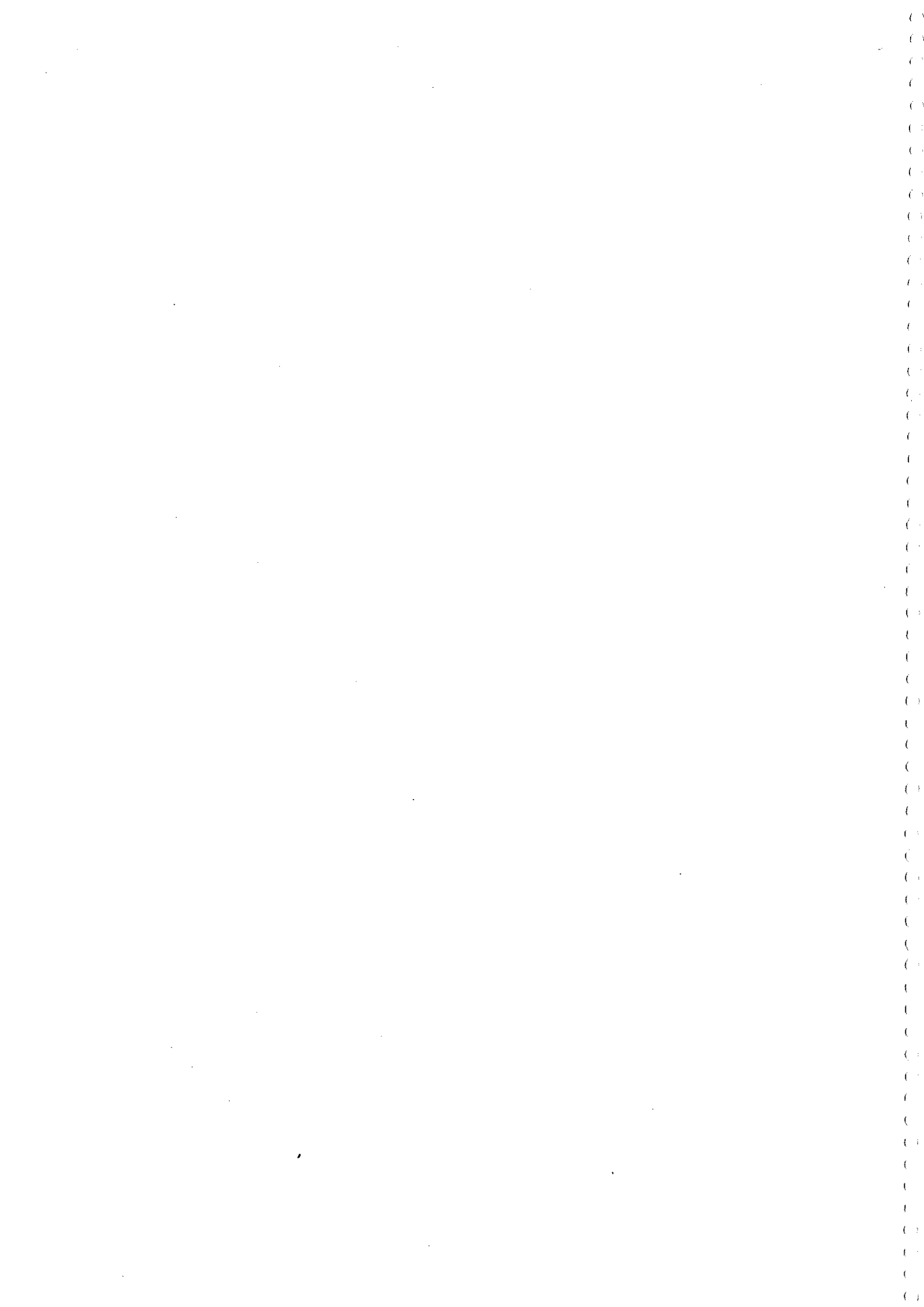
A obtenção de previsões mais precisas passará, possivelmente, pelo estudo detalhado das oscilações de baixa frequência do "setup" e do espraiço, seguindo uma linha de investigação já iniciada e com alguns resultados satisfatórios (Baldock *et al.*, 1997).

*(...) as ondas avançam cada vez mais altas e mais cerradas, primeiro com uma crista lívida de espuma e depois a desabar em catadupas de água, em esguichos de água, em massas que se embatem revolvendo-se, enquanto outras se preparam lá para o largo. Varrem a costa, despedaçam-se nas pedras (...). E a voz imensa deste marulhar de água agitada sobe cada vez mais alto e enche todo o espaço dum clamor que mete medo.*

*Raul Brandão (Os Pescadores)*

## PARTE III

### Morfodinâmica



## 7. ESTUDOS MORFODINÂMICOS DE MACROESCALA

### 7.1. INTRODUÇÃO

A análise da variabilidade morfológica e do transporte sedimentar em zonas costeiras pode ser efectuada a várias escalas espaciais e temporais, desde o movimento instantâneo de grãos até à variação secular ou milenar da linha de costa. Alguns trabalhos têm alertado para a dificuldade de comparação de estudos realizados a diferentes escalas e para a necessidade de análises e considerações separadas de acordo com a escala a que se trabalha. Larson e Kraus (1995) desenvolveram um estudo cujo objectivo principal foi comparar diferentes escalas de análise, relativamente ao cálculo do transporte sedimentar e das variações morfológicas em praias. Nesse trabalho, os autores consideram existir quatro escalas:

i) *microescala*, que integra desde escalas temporais inferiores aos períodos de onda até vários períodos de onda e comprimentos variáveis entre milímetros e centímetros;

ii) *mesoescala*, onde se avaliam taxas globais de transporte para um número elevado de períodos de onda, em distâncias de metros a quilómetros;

iii) *macroescala*, que engloba as variações sazonais e distâncias da ordem dos quilómetros;

iv) *megaescala*, que descreve variações de décadas a séculos, em sectores costeiros extensos.

De acordo com os autores supracitados, o estudo das escalas maiores tem recebido menor atenção do que o da microescala, sendo necessário investir no aprofundamento do conhecimento sobre as meso, macro e megaescalas, por forma a desenvolver aproximações e métodos de cálculo mais adequados. Larson e Kraus (1995) consideram, ainda, que os métodos ou modelos desenvolvidos para macro e megaescalas requerem formulações baseadas em descritores simples dos mecanismos forçadores, sendo necessário introduzir informações relativas aos princípios fundamentais da morfologia costeira de larga escala.

Na sequência do exposto pretende-se, neste capítulo, estudar o comportamento de fenómenos de macroescala, nomeadamente no que respeita ao comportamento morfodinâmico e à sua relação com os factores hidrodinâmicos, para o troço costeiro

entre Aveiro e o Cabo Mondego. Pretende-se, igualmente, analisar a variabilidade sazonal em perfis de praia emersa, que constitui aspecto importante na determinação das modificações do ambiente costeiro, nomeadamente através da interacção barra-berma (Winant *et al.*, 1975; Komar, 1976; Lins, 1985; Inman *et al.*, 1993). No entanto, os principais objectivos deste capítulo prendem-se com a determinação da variabilidade da área em estudo, em geral, e das várias praias estudadas, em particular, definindo critérios de robustez e de resposta relativamente à ondulação incidente, para além da determinação das condições limite de erosão/acrecção ou de transição perfil de barra/perfil de berma.

## 7.2. MÉTODOS

### 7.2.1. Morfologia e volumetria

A morfologia da praia foi obtida através da realização de seis conjuntos de levantamentos topográficos, correspondentes às campanhas MOLICEIRO, com um total de 58 perfis para 10 praias distribuídas ao longo da zona costeira entre Aveiro e o Cabo Mondego. Esses perfis dizem respeito apenas à parte emersa da praia, desde a crista dunar (quando existente) até um nível o mais distante possível, para os meios utilizados. O período analisado nas primeiras cinco campanhas foi de 10 meses (Setembro de 1992 a Junho de 1993), tendo sido descrito o procedimento das campanhas no sub-capítulo 2.1.. A sexta campanha foi efectuada em Abril de 1995. Todos os perfis se encontram referidos a um *datum* horizontal (Zero Hidrográfico), obtido em relação ao nível do mar durante os levantamentos, em maré baixa, num método explicado em 2.1. e semelhante ao utilizado por Calliari e Klein (1993).

O cálculo de variações volumétricas entre perfis foi efectuado recorrendo ao programa SURFER, sendo expresso em  $m^3/m$ , correspondendo à variação volumétrica por metro linear. Os volumes calculados são apenas relativos às variações ocorridas acima do nível médio do mar (2 m ZH), pois nem todos os levantamentos obtidos conseguiram atingir valores muito inferiores a este nível. O limite interno utilizado para o cálculo volumétrico em cada perfil corresponde ao ponto mais próximo de terra no qual deixa de existir variação vertical apreciável, por acção marinha. Assim, a área utilizada no cálculo dos volumes é limitada superiormente pelo próprio perfil, por um

limite interno definido por um ponto  $(x,y)$ , dito *ponto de não-mobilidade relativa* (ao período analisado), pela correspondente linha vertical definida pelos pontos  $(x,y)$  e  $(x,2\text{ m})$  e inferiormente por um limite arbitrário fixado nos 2 m ZH (nível médio do mar) (figura 7.1.).

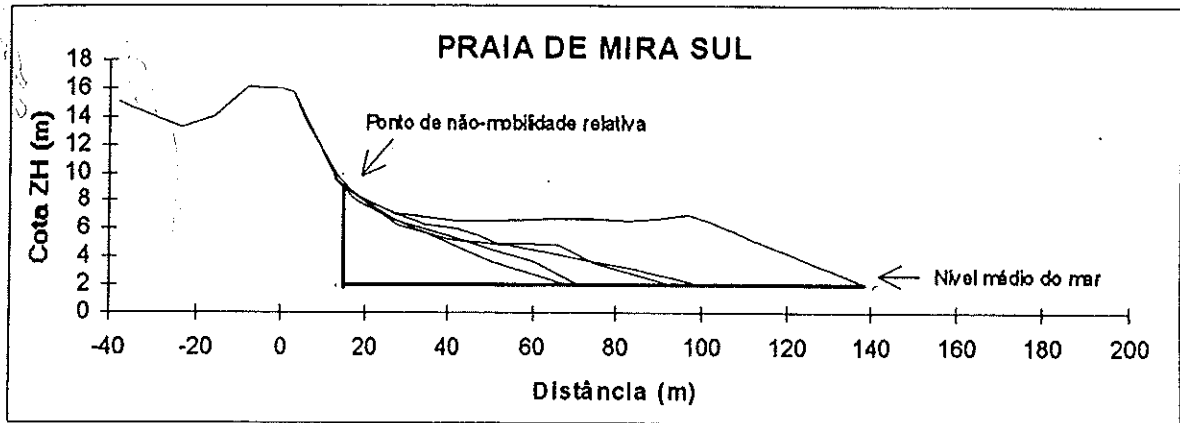


Figura 7.1. Representação esquemática dos limites utilizados no cálculo de volumes.

Para a generalidade dos perfis estudados, o ponto de não mobilidade relativa coincidiu com o contacto duna/praias emersa. No entanto, em alguns casos, correspondeu ao limite alta praia/média praia e noutros ao limite praia/estruturas antrópicas.

Recorrendo aos volumes determinados para cada local, estimou-se a variabilidade nos volumes sedimentares ao longo do período de análise e ao longo da área de estudo.

Para cada conjunto de perfis relativos à mesma praia foi calculado o perfil médio, com base na média das coordenadas  $(x,y)$  de todos os perfis de cada local, usando classes com intervalos de aproximadamente 10 m, com início no ponto de origem. A inexistência, nos intervalos extremos (início e fim de perfil), de pontos suficientes para a determinação de uma média representativa levou a que se tivesse de recorrer a aproximações diferentes, caso a caso, quando necessário. Utilizando os perfis determinou-se, ainda, a variação vertical dos perfis extremos relativamente ao perfil médio, obtendo-se a variação vertical máxima em cada praia. A não continuidade dos perfis para valores inferiores ao Zero Hidrográfico impossibilitou, em alguns casos, a obtenção de valores de máxima variação vertical absolutamente correctos correspondendo estes, por vezes, a valores ligeiramente subestimados.

### 7.2.2. Parâmetros morfodinâmicos

Recorreu-se aos parâmetros morfodinâmicos mais utilizados na literatura, e de maior utilidade, como:

- *Surf scalling parameter* ( $\varepsilon$ ) (Guza e Inman, 1975):

$$\varepsilon = (a_i \omega^2) / (g \tan^2 \beta) \quad (7.1)$$

onde  $a_i$  é a amplitude da onda incidente ( $H/2$ ),  $\omega$  é a frequência angular da onda incidente ( $2\pi/T$ ) e  $\tan\beta$  é o declive da praia;

- *Surf similarity parameter* (Battjes, 1974) ou *número de Iribaren* ( $\xi$ ):

$$\xi_o = \tan\beta / (H_o / L_o)^{0.5} \quad (7.2)$$

ou

$$\xi_b = \tan\beta / (H_b / L_o)^{0.5} \quad (7.3)$$

sendo o índice  $_b$  referente a condições na rebentação e o índice  $_o$  referente a condições ao largo.

O parâmetro  $\varepsilon$  é mais utilizado na área da geomorfologia, sendo relacionável com o estado e com o comportamento da praia, enquanto que o parâmetro  $\xi$  é mais referido na literatura de engenharia costeira, onde é sobretudo utilizado para descrever o tipo de rebentação (Bauer and Greenwood, 1986; Masselink, 1994). Os dois parâmetros são relacionáveis através da relação  $\xi = (\pi/\varepsilon)^{0.5}$  (Carter, 1988).

Um terceiro parâmetro vulgarmente utilizado para caracterizar o tipo de praia é o índice relativo à *velocidade de sedimentação adimensional* ( $\Omega$ ), inicialmente proposto por Gourlay (1968 *in* Masselink, 1994) e posteriormente conhecido como *índice de Dean*:

$$\Omega = H_b / (w_s T) \quad (7.4)$$

onde  $w_s$  representa a velocidade de sedimentação.

Os limites utilizados em cada índice, para separar diferentes comportamentos de praia ou diferentes tipos de rebentação, são variáveis de autor para autor. Apresentam-se na tabela 7.1. alguns dos valores mais frequentemente utilizados na literatura.

Tabela 7.1. Valores limite para os índices morfodinâmicos, de acordo com vários autores.

<b>Tipo de rebentação</b>			
Referência	Progressiva	Mergulhante	"Surging"/"Collapsing"
Battjes (1974)	$\xi_b < 0.4$ $\xi_o < 0.5$	$0.4 < \xi_b < 2.0$ $0.5 < \xi_o < 3.3$	$2.0 < \xi_b$ $3.3 < \xi_o$
Balsillie (1986)	$\xi_b < 0.64$	$0.64 < \xi_b < 5.0$	$5.0 < \xi_o$
Okazaki e Sunamura (1991)	$\xi_o < 0.5$	$0.5 < \xi_o < 2.5$	$2.5 < \xi_o < 3.7$ Collapsing $3.7 < \xi_o$ Surging
Fredsøe e Deigaard (1992)	$\xi_b < 0.4$	$0.4 < \xi_b < 2.0$	$2.0 < \xi_b$
Fredsøe e Deigaard (1992)	$\xi_o < 0.5$	$0.5 < \xi_o < 3.3$	$3.3 < \xi_o$
<b>Comportamento da praia</b>			
Referência	Reflectiva	Intermédia	Dissipativa
Wright e Short (1984)	$\varepsilon < 2.5$	$2.5 < \varepsilon < 30$	$\varepsilon > 30$
Carter (1988)	$0.1 < \varepsilon < 2.5$	$2.5 < \varepsilon < 20$	$20 < \varepsilon < 200$
Carter (1988)	$\xi_o > 1.0$	$0.23 < \xi_o < 1.0$	$\xi_o < 0.23$
Wright e Short (1984)	$\Omega < 1$	$1 < \Omega < 6$	$\Omega > 6$
Masselink (1994)	$\Omega < 2$	$2 < \Omega < 5$	$\Omega > 5$

Fredsøe e Deigaard (1992) referem que as diferenças entre os dois critérios para definição do tipo de rebentação ( $\xi_o$  e  $\xi_b$ ) são apreciáveis, podendo ser tomadas como uma indicação da incerteza associada à previsão das características na rebentação. O mesmo poderá ser advogado relativamente à determinação do comportamento da praia, se observarmos os distintos critérios e as diferenças nos limites dos valores.

### 7.3. AGITAÇÃO MARÍTIMA AO LARGO

Durante o período de análise (Setembro 92 a Junho 93), o ondógrafo do Instituto Hidrográfico situado ao largo da Figueira da Foz esteve sempre em funcionamento, permitindo uma análise das condições de agitação desse período. O ondógrafo obteve registos de 20 minutos de 3 h em 3 h, excepto quando ocorreram temporais ( $H_{s0} > 5$  m), situações em que o registo se torna praticamente contínuo (registos de 20 minutos de 0.5 h em 0.5 h). Para a análise efectuada foi escolhido o

espaçamento definido, de 3 horas, pelo que os registos intermédios, durante temporais, não foram contabilizados, por forma a não introduzirem uma sobrestima da altura da onda nos cálculos finais. O reduzido número de interrupções nos registos permitiu obter uma percentagem total de observações elevada (94.1%), variando entre um mínimo de 77.4% (Maio 93) e um máximo de 100% (Janeiro 92; Fevereiro 92).

Os valores médios mensais de alturas significativas ao largo ( $H_{s0}$ ), período de pico ao largo ( $T_p$ ) e rumo ao largo ( $D_o$ ) estão expressos na tabela 7.2..

**Tabela 7.2.** Valores médios mensais de  $H_{s0}$ ,  $T_p$  e  $D_o$ , para a Figueira da Foz.

Mês/Ano	$H_{s0}$ (m)	$T_p$ (s)	$D_o$ (°)
Set/92	1.80	9.8	324
Out/92	2.03	10.3	324
Nov/92	2.37	12.0	313
Dez/92	2.92	13.2	311
Jan/93	2.68	12.9	311
Fev/93	1.98	11.9	320
Mar/93	2.21	12.4	314
Abr/93	2.57	11.1	321
Mai/93	1.71	9.3	297
Jun/93*	1.83	10.5	326
Set/92 - Jun/93	2.21	11.3	316

\* Apenas há registo até 16/6/93

Registaram-se máximos mensais de  $H_{s0} = 2.92$  m e  $T_p = 13.2$  s em Dezembro de 1992, e mínimos de  $H_{s0} = 1.71$  m e  $T_p = 9.3$  s em Maio de 1993. Os valores médios mensais e totais obtidos para o período analisado são semelhantes aos apresentados por C. Costa (1994) como representativos do clima de agitação, tendo por base a análise de cerca de 3 anos de registos. Assim, é possível considerar que o período analisado possuiu condições de agitação médias semelhantes a um ano médio normal.

Na tabela 7.3. apresentam-se os valores médios das condições de agitação vigentes para cada intervalo entre levantamentos topográficos sucessivos, sendo observável que os valores de altura mais elevada se registaram nos dois primeiros períodos, decrescendo posteriormente.

**Tabela 7.3.** Valores médios de agitação ao largo na Figueira da Foz, para os intervalos entre levantamentos.

Período	$H_{s0}$ (m)	$T_p$ (s)	$D_o$ (°)
27 Set/92 - 10 Dez/92	2.46	11.5	317
10 Dez/92 - 6 Fev/93	2.47	12.9	312
8 Fev/93 - 20 Mar/93	2.13	11.8	316
22 Mar/93 - 8 Jun/93	2.09	10.5	310

#### 7.4. CARACTERIZAÇÃO MORFODINÂMICA

A aplicação dos parâmetros morfodinâmicos descritos, que permitem caracterizar o comportamento morfodinâmico de determinado sector litoral não é linear, nem óbvia, no que respeita à escolha dos valores a introduzir, sobretudo relativamente ao pendor da praia e à altura da onda. A existência de vários pendores, desde a face da praia até à profundidade de fecho da praia submersa, permite a escolha de uma gama elevada de declives reais, mas provavelmente não representativos. Esta situação é ainda mais difícil de contornar em praias com barras, onde a variabilidade da praia é acentuada, quer em termos de pendor, quer relativamente à própria altura da onda na rebentação, visto esta possuir várias rebentações ao longo do seu percurso. Assim, torna-se difícil escolher um único pendor e uma única condição de agitação, com risco de estes não serem adequados à generalidade da área a caracterizar. Vários autores têm recorrido à utilização de valores médios, classificando a área de estudo como possuindo praias de comportamento intermédio (Ferreira *et al.*, 1994; Teixeira, 1994; Tomás, 1995). Utilizando a classificação de Wrigth e Short (1984), estas praias são classificadas como pertencendo aos tipos intermédios TBR (“Transverse bar and rip state”) e RBB (“Rhythmic bar and beach stage”) (Ferreira *et al.*, 1994). De acordo com a classificação proposta por Masselink e Short (1993) e depois revista por Masselink (1994) e por Masselink e Hegge (1995), as praias deste troço costeiro continuam a integrar-se num grupo de características intermédias, do tipo “barred” (praia com barra), sendo de esperar a presença de lobos de praia (“beach cusps”) e de uma face da praia com pendor acentuado, o que se confirma nas observações de campo.

A utilização de um único valor médio para a obtenção dos parâmetros morfodinâmicos é comum. Contudo, a resultante desses parâmetros não é constante, quer por variações no pendor da praia, quer por variações das condições de agitação ao longo do espaço e do tempo (Bauer e Greenwood, 1985). Desta forma, os parâmetros morfodinâmicos, apesar de serem descritores úteis dos sistemas de praia e pré-praia, não permitem a compreensão total desses sistemas (Bauer e Greenwood, 1985).

Na área em estudo, a utilização de um pendor médio tem como consequência atenuar e suavizar as barras, descrevendo uma praia plana, regular, sem acidentes

topográficos e sem variabilidade morfológica. Por outro lado, o recurso à altura de onda apenas na primeira rebentação fornece indicações do comportamento nesse local, provavelmente afastado algumas centenas de metros da linha de costa, não representando a totalidade das condições ao longo do seu percurso de rebentação, reformação, progressão e nova rebentação, até atingir a face da praia. Face ao exposto, e seguindo o procedimento e sugestões de outros autores (Horn, 1993; Masselink e Short, 1993; Masselink, 1994), optou-se por dividir a praia em sectores, correspondentes aos vários locais onde ocorre transformação das condições de ondulação e rebentação. Para a área em estudo, e de acordo com as observações efectuadas, consideraram-se os seguintes sectores: face da barra externa (FBE), face da barra interna (FBI) e face da praia (FP). Para a determinação dos pendores na praia submersa utilizaram-se os levantamentos batimétricos de 1987 e 1990, tendo-se calculado o declive entre a crista de cada barra e o seu limite externo. Não foram consideradas as partes internas das barras por possuírem inclinação para terra e por sobre elas não ocorrer empolamento e rebentação (figura 7.2.).

Para a obtenção dos pendores da face da praia foram calculados todos os valores referentes aos cinco levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993, obtendo-se um valor médio anual representativo de cada perfil. Os valores obtidos estão expressos na tabela 7.4..

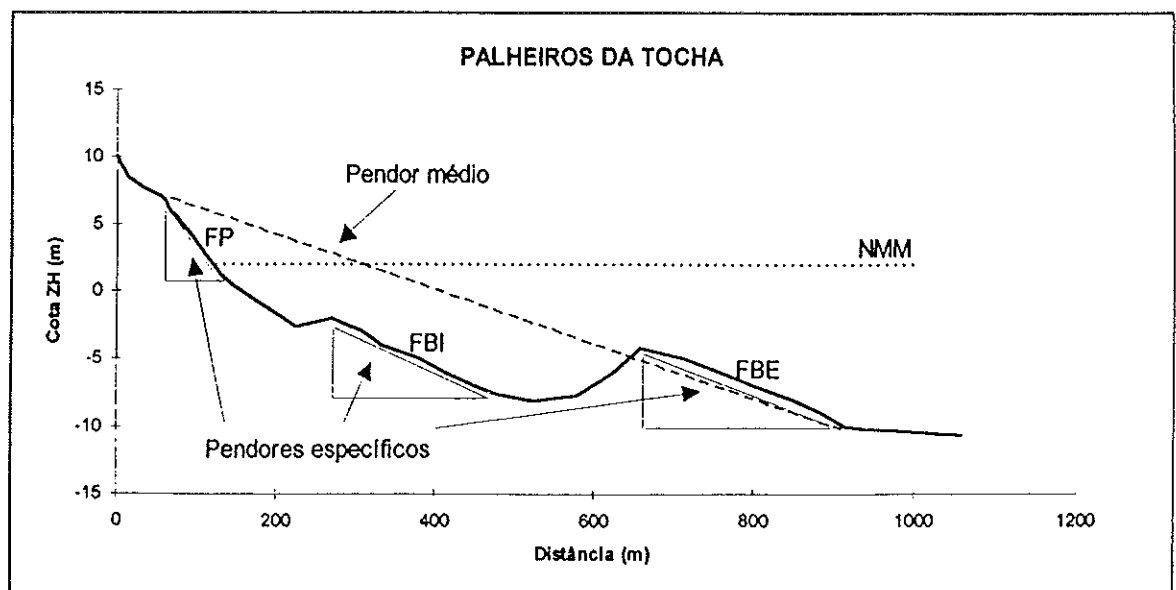


Figura 7.2. Esquema de separação de sectores para cálculo de pendores específicos e comparação com pendor médio. FBE = face da barra externa, FBI = face da barra interna, FP = face da praia; NMM = nível médio do mar.

Tabela 7.4. Pendores das faces da barra externa, barra interna e praia emersa por local e para a totalidade da área de estudo.

Barra externa			Barra interna			
Praias	1987	1990	Média	1987	1990	Média
C	0.018	0.013	0.016	0.020	0.033	0.027
PT	0.023	0.016	0.020	0.030	0.020	0.025
CM	0.020	0.025	0.023	0.024	0.019	0.022
PMS	0.021	0.027	0.024	*	0.023	0.023
PMN	0.024	0.028	0.026	*	0.026	0.026
PA	0.020	0.030	0.025	0.024	0.024	0.024
PVN	0.020	0.024	0.022	0.012	0.024	0.018
Média	0.021	0.023	0.022	0.022	0.024	0.023

Face da praia						
Praias	Set/92	Dez/92	Fev/92	Mar/92	Jun/92	Média
PQ	0.11	0.09	0.11	0.14	0.12	0.11
C	0.10	**	0.09	0.07	0.09	0.09
PT	0.06	0.07	0.08	0.10	0.09	0.08
CM	0.14	0.13	0.06	0.09	0.07	0.10
PMS	0.11	0.11	0.10	0.06	0.12	0.10
PMN	0.06	0.07	0.10	0.09	0.11	0.09
PA	0.06	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07
VS	0.12	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08
VE	0.10	0.07	0.10	0.09	0.05	0.08
VN	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08	0.09
Média	0.10	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09

PQ - Praia de Quiaios; C - Costinha; PT - Palheiros da Tocha; CM - Canto do Marco; PMS - Praia de Mira Sul; PMN - Praia de Mira Norte; PA - Praia do Areão; VS - Vagueira Sul; VE - Vagueira entre esporões; VN - Vagueira Norte. \* Barra interna não registada. \*\* Não se efectuou levantamento.

Para o cálculo dos vários parâmetros utilizaram-se as médias de cada sector, em cada perfil, que estão marcadas a sombreado na tabela 7.4.. Não foram encontradas tendências significativas de variação dos pendores ao longo da zona estudada, excepto para a face da praia, onde os dados parecem sugerir uma tendência de diminuição de pendor para norte, sendo a máxima variação total prevista entre extremos de cerca de 0.02 (figura 7.3.), valor inferior às variações entre locais contíguos.

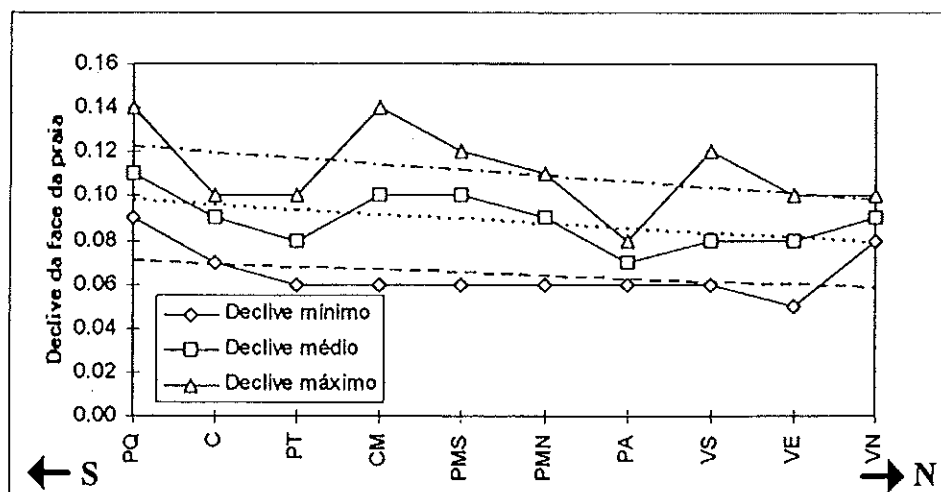


Figura 7.3. Variação longitudinal do pendor da face da praia e linhas de tendência ajustadas a cada dos declives representados.

Relativamente às faces das barras, o seu pendora parece ser, em média, muito similar, possuindo valores médios ligeiramente superiores a 0.02. A escassez de levantamentos e a variabilidade de valores detectada não permite ter uma ideia correcta da existência ou não de uma variação tendencial do declive ao longo da área de estudo.

#### 7.4.1. Morfodinâmica da barra externa

##### 7.4.1.1. Tipo de rebentação

Utilizando os valores médios anuais determinados para as condições de agitação e para o pendora da face da barra ( $H_o = 2.2$  m;  $H_b = 3.0$  m;  $T_p = 11.3$  s;  $\tan\beta = 0.022$ ), obtêm-se valores de  $\xi_o = 0.21$  e de  $\xi_b = 0.18$ , o que indica a existência de rebentação predominante do tipo “spilling” (progressiva) sobre a barra externa.

Admitindo uma variação nos valores de  $\tan\beta$  entre 0.016 e 0.026, correspondente aos extremos médios da área, e mantendo os valores de  $H_o$ ,  $H_b$  e  $T_p$ , os valores obtidos variariam entre  $0.15 < \xi_o < 0.25$  e  $0.13 < \xi_b < 0.21$ , o que representaria sempre condições dominantes de rebentação progressiva.

Por forma a determinar a variação da rebentação relativamente a várias condições de ondulação incidente, calcularam-se os valores dos parâmetros  $\xi_o$  e  $\xi_b$  para conjuntos ( $H_o$ ,  $T_p$ ) e ( $H_b$ ,  $T_p$ ). Para a elaboração destes conjuntos recorreu-se às distribuições de alturas por períodos e rumos apresentadas por C. Costa (1994) e por M. Costa (1994b), para os dados da Figueira da Foz, usando apenas o rumo predominante de NW e calculando o valor de  $T_p$  para cada classe de altura de onda. De acordo com este procedimento, usaram-se os conjuntos:

( $H_o$ ,  $T_p$ ) - (2.5, 12.3); (3.5, 13.0); (4.5, 14.2); e (5.5, 15.2),

( $H_b$ ,  $T_p$ ) - (3.5, 12.3); (4.7, 13.0); (5.9, 14.2); e (7.1, 15.2),

sendo  $H_b$  calculada em função de  $H_o$  e do respectivo  $T_p$ , usando a expressão proposta por Komar e Gaughan (1972). Os resultados obtidos estão expressos na figura 7.4., onde se pode observar uma diminuição do valor de  $\xi$  com o aumento de  $H$ , ou seja,

uma tendência acrescida para condições de rebentação do tipo progressivo. Não estão expressos no gráfico valores de  $H_o$  inferiores a 2.5 m e de  $H_b$  inferiores a 3.0 m por se considerar que para tais valores não ocorre rebentação completa sobre a barra externa.

De acordo com os cálculos efectuados seriam necessárias ondas com cerca de 0.3 m a 0.4 m para que ocorresse predomínio de rebentação do tipo mergulhante, pelo que, teoricamente, tal nunca se chegaria a verificar, visto que ondas com tal altura não rebentam sobre a barra externa. No entanto, de acordo com observações de campo, a rebentação do tipo mergulhante pode ocorrer sobre a barra externa, para ondas de maior porte, ainda que geralmente se observe a propagação da onda em restolhar característico de rebentação progressiva, após o colapso da crista da onda. Contudo, a rebentação do tipo progressivo correspondeu quase sempre à rebentação dominante, neste sector da praia.

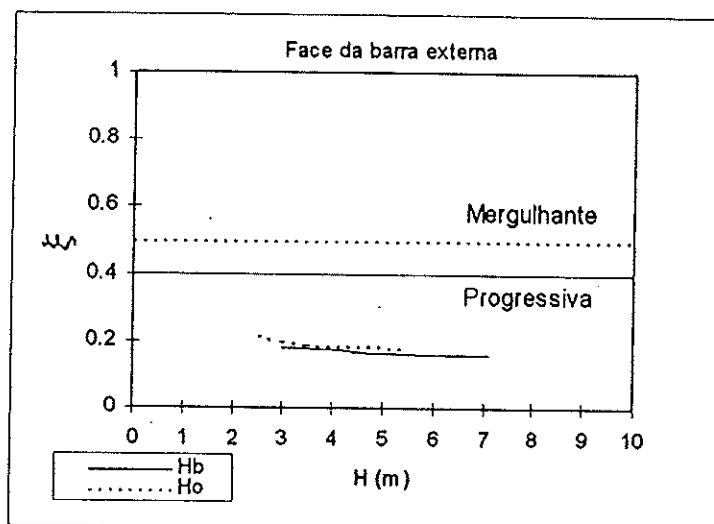


Figura 7.4. Variação do tipo de rebentação na face da barra externa, em função da agitação, com indicação dos limites entre os tipos mergulhante e progressivo, para condições ao largo e na rebentação.

#### 7.4.1.2. Comportamento da face da barra externa

Recorreu-se aos parâmetros  $\epsilon$  e  $\Omega$  para determinar o comportamento da face da barra externa, utilizando os valores médios de agitação mencionados em 7.4.1.1., conjuntamente com o valor de  $w_s = 0.04$  m/s, determinado de acordo com as formulações de Gibbs *et al.* (1971), para um diâmetro médio de 0.3 mm na face da barra externa, de acordo com os dados de Ferreira (1993). Obtiveram-se  $\epsilon = 71.7$  e  $\Omega = 6.6$ , ambos reflectindo características dissipativas. Admitindo uma variação possível no pendor da face da barra externa, entre 0.016 e 0.026, determinou-se o intervalo de

variação  $51.3 < \varepsilon < 135.6$ , mantendo  $\Omega$  o mesmo valor, por não ser dependente do pendor. Apesar das variações admitidas, o comportamento dominante continua a ser dissipativo.

Fazendo um exercício semelhante ao estabelecido no ponto anterior, relativamente à conjugação de valores (H, T) e usando os mesmos conjuntos, regista-se um esperado aumento de  $\varepsilon$  e de  $\Omega$  e das características dissipativas deste sector, com o aumento da altura da onda (figura 7.5.). Tal facto é concordante com o aumento relativo da dissipação de energia para ondas de maior porte, observado no sub-capítulo 5.4..

Tal como no ponto anterior, também não foram consideradas alturas de onda inferiores a  $H_o = 2.5$  m e de  $H_b = 3.0$  m, por se considerar que tais ondas não possuem rebentação completa sobre a barra. Sendo verdade que para ondas menores o comportamento dissipativo vai perdendo importância, o que é demonstrado pela menor percentagem de dissipação de energia dessas ondas, seria no entanto absurdo considerar que a face da barra possuiria um comportamento reflectivo relativamente a uma onda com, por exemplo 0.4 m de altura, visto que esta continuaria a sua progressão para terra sem alteração das suas características.

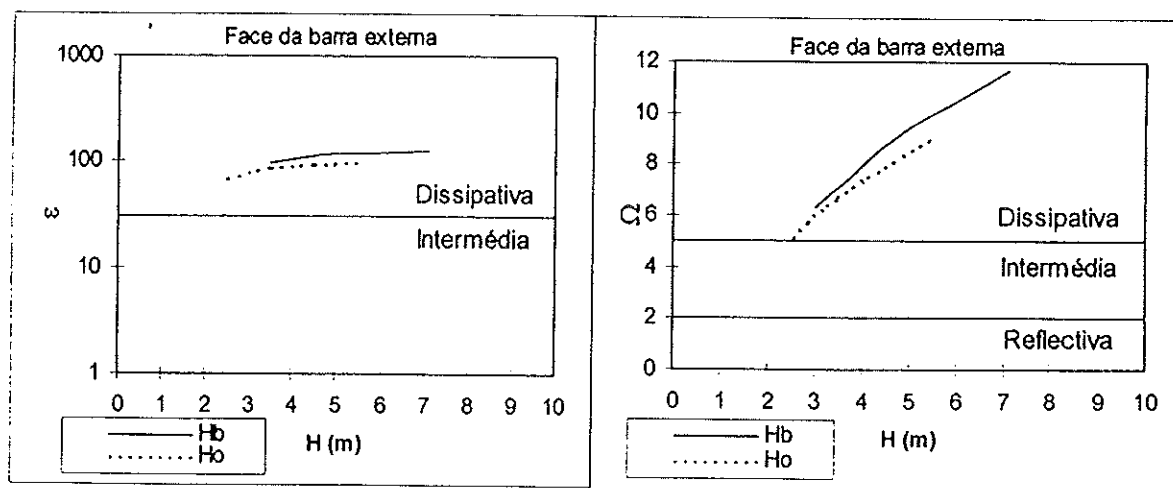


Figura 7.5. Comportamento da face da barra externa em função das condições da agitação.

#### 7.4.2. Morfodinâmica da barra interna

Tendo por base as observações efectuadas na campanha Tocha 92 e expressas no sub-capítulo 4.3., verificou-se que a altura da onda que tipicamente rebenta sobre a barra interna possui valores de  $H_b$  superiores a 1.3 m e inferiores a 2.1 m, ainda que as

alturas ao largo possam ser bastante superiores. Tal deve-se ao efeito de filtro ou de amortecimento provocado pela barra externa, através da rebentação das ondas com altura superior, não permitindo a sua completa progressão. Por esta razão, os cálculos efectuados relativamente ao comportamento morfodinâmico da face da barra interna utilizarão apenas valores de alturas compreendidas no intervalo referido. Admite-se, no entanto, que esse intervalo seja variável, dependendo das condições da barra externa em cada local e da maré. Por outro lado, as condições observadas em Tocha 92 referem-se apenas a um período de observação de 3 semanas, insuficientes para uma análise completa de macroescala, como a pretendida neste capítulo. É ainda de referir que, nas situações em que a barra interna não exista, por completa adesão à praia, gerando uma berma, a aproximação aqui efectuada não será válida, sendo a gama de alturas referida directamente transferida para a face da praia, com menor atenuação de energia e de altura da onda, pela inexistência de rebentação sobre a barra interna.

#### 7.4.2.1. Tipo de rebentação

Pelo facto de se tratar de uma situação de barra interna, onde é impossível diferenciar se uma onda com  $H_b = 2.0$  m resulta de uma onda incidente com  $H_o = 1.5$  m (baixa energia), que não teve rebentação inicial sobre a barra externa e que sofreu empolamento na barra interna, ou de uma onda com  $H_o = 4.5$  m (elevada energia), que possui rebentação sobre a barra externa, com cerca de 90% de dissipação de energia, não é possível aplicar parâmetros relativos à altura da onda ao largo ( $\xi_o$ ), sendo apenas curial a utilização de condições de agitação na rebentação. Resta, no entanto, a dificuldade de escolha do período a utilizar, visto que ondas com tanta diferença na altura ao largo estão geralmente associadas a períodos diferentes. Assim, escolheram-se dois períodos representativos dos dois tipos de agitação referidos,  $T_p = 11$  s (baixa energia) e  $T_p = 15$  s (elevada energia), considerando neste último caso que não ocorre alteração do valor do período de pico com a rebentação sobre a barra externa.

Aplicando as gamas de valores de  $H_b$  e de  $T_p$  mencionadas, os valores de  $\xi_b$  variam entre 0.22 e 0.38, para um declive médio da face da barra interna de 0.023. Desta forma, será de admitir uma rebentação predominante do tipo progressivo, sobre a barra interna, ainda que tendente para situações de rebentação mergulhante ou

tubular ( $\xi_b > 0.4$ ), para ondas de maior período ou de menor porte. Na figura 7.6. encontra-se um gráfico demonstrativo da evolução de  $\xi_b$  de acordo com a variação de  $H_b$ , para  $T_p = 11$  s e  $T_p = 15$  s. Com o aumento do declive do fundo, tende a ocorrer rebentação mais próxima do tipo mergulhante.

Os valores apresentados reportam-se apenas a situações médias anuais, podendo ser discutíveis face às observações de campo. Na realidade, o comportamento observado, relativamente à rebentação sobre a barra interna, possui variações diárias apreciáveis, não causadas por alterações nas características das ondas incidentes ou da morfologia do fundo, mas pela variação da maré. Efectivamente, durante a maré baixa, a rebentação predominante é do tipo progressivo, para a quase totalidade das condições de agitação observadas ao longo das campanhas de campo. Contudo, na maré alta, essa situação não se mantém, passando a rebentação a ser sobretudo do tipo mergulhante. Estas alterações morfodinâmicas, associadas à variação diária da maré, foram já estudadas por outros autores, salientando-se o trabalho de Horn (1993). Desta forma, os valores médios obtidos não são representativos da totalidade de condições observadas, devendo ser interpretados apenas no conceito de macroescala mencionado no início deste capítulo. Por outro lado, a variabilidade morfológica de curto e médio prazo nesta barra é muito superior à observável para a barra externa, o que introduz uma apreciável variabilidade no tipo de rebentação.

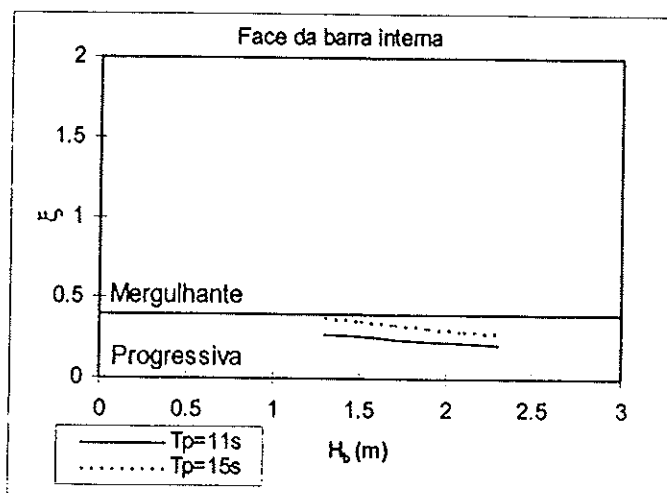


Figura 7.6. Variação do tipo de rebentação sobre a barra interna, de acordo com a altura e período da onda.

#### 7.4.2.2. Comportamento da face da barra interna

Relativamente ao cálculo dos valores correspondentes aos parâmetros  $\epsilon$  e  $\Omega$ ,

utilizaram-se os valores de  $H_b$ ,  $T_p$  e  $\tan\beta$  atrás referidos. Para o cálculo de  $\Omega$  considerou-se uma granulometria média de 0.4 mm, sobre a face da barra interna, de acordo com os valores de Ferreira (1993), ao que corresponde um valor de  $w_s = 0.06$  m/s, utilizando as formulações de Gibbs *et al.* (1971), para uma temperatura de 15°C e salinidade de 35 psu. Os resultados obtidos estão expressos na figura 7.7., observando-se que de acordo com o parâmetro  $\Omega$  se está num estado intermédio para a quase totalidade das situações, passando a reflectivo para períodos mais elevados. Relativamente ao parâmetro  $\epsilon$ , aponta para características dissipativas a intermédias, registando-se este último estado em situações de “swell” (período elevado). A um aumento do pendor corresponde uma aproximação aos estados reflectivos.

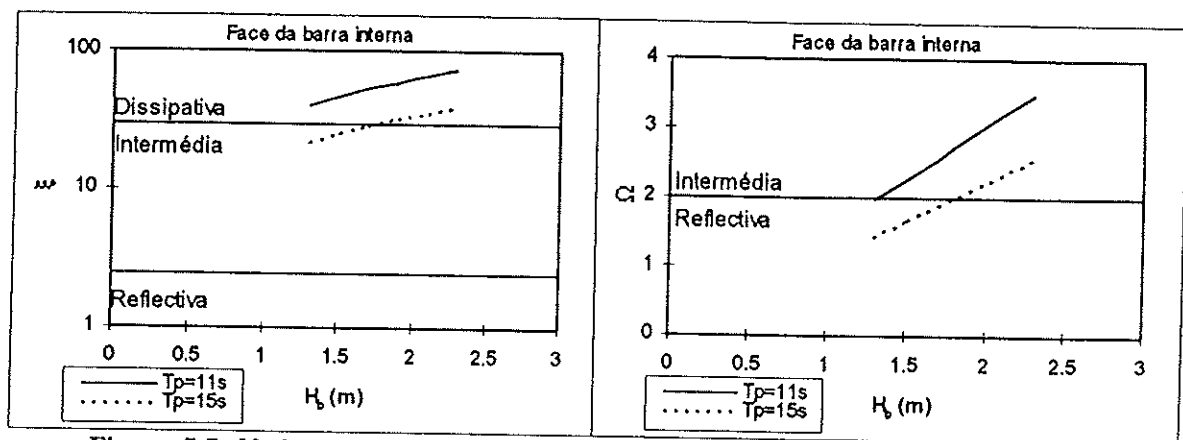


Figura 7.7. Variação no comportamento da face da barra interna, de acordo com a altura e período da onda.

A variação nos resultados obtidos pela utilização dos dois parâmetros é devida à existência de um pendor médio relativamente baixo em  $\epsilon$  e de uma velocidade de sedimentação relativamente elevada em  $\Omega$ , o que está em contradição. O escasso número de amostras analisadas, respeitantes à face da barra interna poderá ter levado a uma sobrestima da média granulométrica e, conseqüentemente, da velocidade de sedimentação utilizada.

A análise dos valores permite considerar a barra interna como correspondente a uma área de transição, com comportamento intermédio entre o domínio dissipativo e o domínio reflectivo, ainda que esteja genericamente mais próximo do dissipativo.

#### 7.4.3. Morfodinâmica da face da praia

Recorrendo aos dados da campanha Tocha 92, observou-se que em praias com

barra externa e interna bem desenvolvidas a altura da onda na rebentação sobre a face da praia, em maré alta, esteve geralmente compreendida entre 0.5 m e 1.0 m, independentemente da altura da onda ao largo, devido à dissipação de energia induzida pelas barras, através de sucessivas rebentações. Desta forma, os cálculos relativos ao comportamento morfodinâmico da face da praia deveriam utilizar valores de altura de onda inferiores a 1 m. No entanto, serão ainda englobados valores superiores, até aos 2.5 m, admitindo assim uma situação de inexistência de barra interna (ex.: campanha Areão 95), com rebentação apenas sobre a barra externa e na face da praia.

#### 7.4.3.1. Tipo de rebentação

Para a determinação do tipo de rebentação foram utilizadas alturas de ondas na rebentação entre 0.4 m e 2.5 m. Não foram utilizados valores inferiores a 0.4 m por este corresponder ao valor mínimo obtido nos registos de agitação da Figueira da Foz, para o período Julho 90 - Setembro 93 (M. Costa, 1994b), sendo rara a ocorrência de agitação com valor, ao largo, inferior a 0.5 m. Não se utilizaram valores superiores a 2.5 m por não ser frequente a existência de rebentação directa, sobre a face da praia, com altura superior a esse valor, dada a forte dissipação de energia existente sobre a barra externa e, em geral, ao longo de toda a zona de "surf".

Tal como para a barra interna, a impossibilidade de determinar se as alturas mencionadas reflectem condições de agitação com energia moderada ou elevada, ao largo, não permite definir os períodos médios associados às alturas utilizadas. Assim, optou-se pela escolha de dois períodos representativos destas duas condições de agitação. Um período  $T_p = 10.2$  s, respeitante à média obtida para ondas menores do que 1 m, ao largo, tendo por base os dados de C. Costa (1994) e M. Costa (1994b) e um período  $T_p = 15$  s que pretende representar condições de energia elevada ao largo. Durante a campanha Tocha 92 ocorreram situações energéticas distintas (variação de  $H_o$  entre 1.2 m e 6.7 m), às quais esteve associada uma gama de  $T_p$  (ao largo) entre 8 s e 17 s, tendo os períodos observados junto à face da praia variado entre 9 s e 15 s, pelo que os valores escolhidos parecem corresponder a situações de variação reais.

Admitindo um pendor médio de 0.09, para a generalidade da face da praia na área de estudo, obtêm-se os valores de  $\xi_b$  expressos na figura 7.8., verificando-se que a

rebentação do tipo mergulhante ou tubular é predominante, tendo tendência para ser do tipo “surging” com a diminuição da altura da onda. Nas observações de campo, ao longo das campanhas efectuadas, verificou-se que, em maré alta, a rebentação sobre a face da praia foi quase sempre do tipo mergulhante. No entanto, durante marés baixas vivas pode ocorrer rebentação progressiva, mesmo com ondas de pequena altura, por diminuição do pendor, devido à existência de um terraço de maré ou de um conjunto lomba-canal.

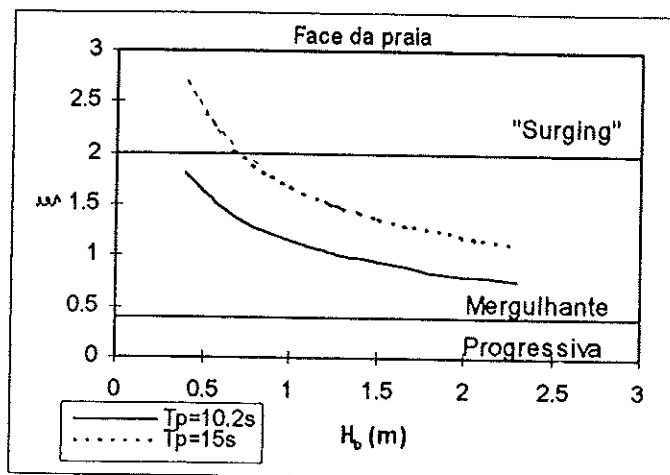


Figura 7.8. Variação do tipo de rebentação na face da praia de acordo com a variação na altura da onda.

Atendendo às variações no pendor médio das praias e usando os extremos obtidos ( $PA = 0.07$ ;  $PQ = 0.11$ ), verifica-se que a rebentação predominante prevista nunca atinge os valores referentes ao tipo progressivo, sendo genericamente mergulhante (tabela 7.5.).

Tabela 7.5. Variação do “surf similarity parameter” em função de  $H_b$  e de  $T_p$ , para as praias com declives médios mais afastados.

Praias	$H_b=1.0m; T_p=10.2s$	$H_b=0.5m; T_p=15s$	$H_b=2.5m; T_p=15s$	$H_b=1.0m; T_p=15s$
P. Areão	$\xi_b = 0.9$	$\xi_b = 1.3$	$\xi_b = 1.1$	$\xi_b = 1.7$
P. Quiaios	$\xi_b = 1.4$	$\xi_b = 2.0$	$\xi_b = 1.3$	$\xi_b = 2.1$

#### 7.4.3.2. Comportamento da face da praia

Para a determinação dos parâmetros  $\xi$  e  $\Omega$  recorreu-se aos valores de  $H_b$  e  $T$  atrás referidos, fazendo-se igualmente determinações para cada praia, em função do seu pendor. Para o cálculo do parâmetro de Dean utilizou-se, ainda, uma granulometria média para o conjunto da área de 0.5 mm, ao que corresponde uma velocidade de sedimentação próxima de 0.07 m/s, de acordo com as formulações de

Gibbs *et al.* (1971). Os valores obtidos estão apresentados na figura 7.9., observando-se um claro predomínio do comportamento reflectivo para qualquer dos parâmetros, nos dois períodos utilizados, sobretudo para períodos elevados. No entanto, para valores de  $T = 10.2$  s e  $H_b > 1.0$  m, o comportamento da praia poderá corresponder a uma situação intermédia.

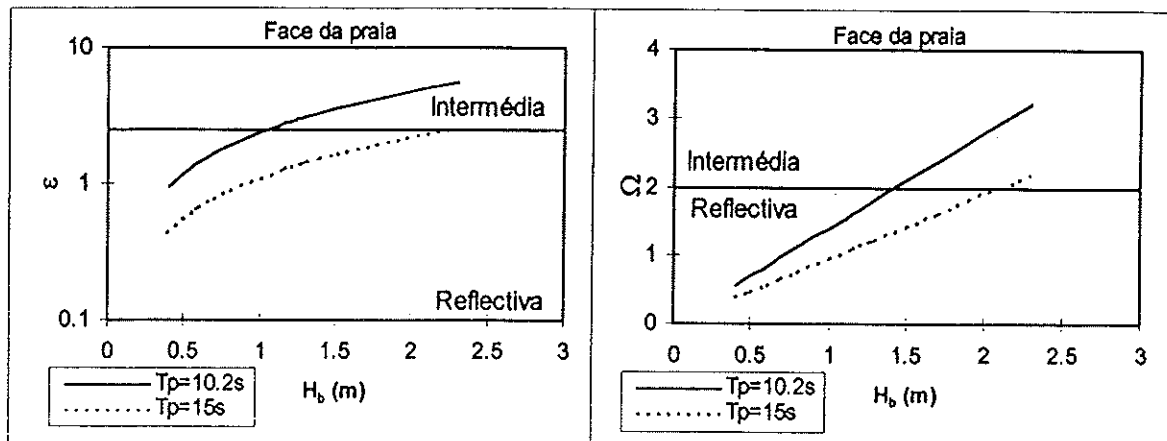


Figura 7.9. Comportamento da face da praia em função da altura e do período da onda.

Relativamente à variação de praia para praia, de acordo com os pendores médios determinados, verifica-se uma maioria de situações reflectivas, ainda que, em alguns casos ( $\tan\beta < 0.09$ ), se verifiquem situações de comportamento intermédio, sobretudo para valores de  $H_b$  e  $T$  elevados (tabela 7.6.).

Tabela 7.6. Variações dos parâmetros  $\epsilon$  e  $\Omega$  em função de  $H_b$  e de  $T$ , para as praias com declives médios mais afastados.

Praias	$H_b=1m; T_p=10.2s;$ $w_s=0.07$ m/s	$H_b=0.5m; T_p=10.2s;$ $w_s=0.07$ m/s	$H_b=2.5m; T_p=15s;$ $w_s=0.07$ m/s	$H_b=1m; T_p=15s;$ $w_s=0.07$ m/s
P. Areão	$\epsilon = 4.0; \Omega = 1.4$	$\epsilon = 2.0; \Omega = 0.7$	$\epsilon = 4.6; \Omega = 2.4$	$\epsilon = 1.8; \Omega = 1.0$
P. Quiaios	$\epsilon = 1.6; \Omega = 1.4$	$\epsilon = 0.8; \Omega = 0.7$	$\epsilon = 1.8; \Omega = 2.4$	$\epsilon = 0.7; \Omega = 1.0$

#### 7.4.4. Integração morfodinâmica

Como foi atrás explicado, não se afigura correcto considerar unicamente condições médias de praia (morfológicas, granulométricas e de agitação) para caracterização do seu comportamento morfodinâmico, visto que cada praia é composta por várias zonas, com diferentes características relativamente aos factores referidos. No entanto, é possível obter maior detalhe na caracterização considerando cada zona como detentora de um comportamento médio semelhante e deduzindo um comportamento morfodinâmico integrado ao longo da totalidade das zonas de

transformação, reformação e rebentação das ondas, permitindo obter uma perspectiva de conjunto para várias situações. As situações escolhidas, e que se julga serem as mais representativas das condições vigentes na área de estudo, são as seguintes:

Situação A - Utilização dos valores médios de agitação ( $H_b$  e  $T_p$ ) para uma praia com barra externa, barra interna e face da praia;

Situação B - Determinação do comportamento morfodinâmico para uma gama de períodos e alturas, em praias com barra externa, barra interna e face da praia;

Situação C - Determinação do comportamento morfodinâmico para uma gama de períodos e alturas, em praias sem barra interna.

Relativamente ao declive da praia e à velocidade de sedimentação recorre-se, para todas as situações, aos valores médios de cada zona da praia (face da barra externa, face da barra interna e face da praia) para a globalidade da área de estudo, visto se querer caracterizar a totalidade da área e não apenas um local ou praia em particular. Os valores utilizados para cada cenário estão expressos na tabela 7.7., onde os índices 1, 2 e 3 se referem, respectivamente, à rebentação na barra externa, na barra interna e na face da praia.

Tabela 7.7. Valores utilizados em cada cenário, para a integração morfodinâmica.

Cenário	Barra externa			Barra interna		Face da praia				
	$H_{b1}$ (m)	$H_{b2}$ (m)	$H_{b3}$ (m)	$T_p$ (s)	$\tan\beta$	$w_s$ (m/s)	$\tan\beta$	$w_s$ (m/s)	$\tan\beta$	$w_s$ (m/s)
A	3.0 <sup>a</sup>	1.4 <sup>b</sup>	0.8 <sup>c</sup>	11.3	0.022	0.04	0.023	0.06	0.09	0.07
B	3-7	1-3	0-1	10-18	0.022	0.04	0.023	0.06	0.09	0.07
C	3-7	<sup>d</sup>	1-3	10-18	0.022	0.04	<sup>d</sup>	<sup>d</sup>	0.09	0.07

<sup>a</sup> Valor estimado através da teoria da onda solitária (Munk, 1949) e pela formulação de Komar e Gaughan (1972), usando  $T_p = 11.3$  s e  $H_o = 2.2$  m. <sup>b</sup> Valor estimado utilizando uma dissipação de energia de 90% (dissipação média para ondas com  $H_{b1} = 3.0$  m, de acordo com os dados de Tocha 92).

<sup>c</sup> Valor estimado de acordo com a aplicação da equação 5.6, para a qual se obtém uma dissipação média de 98.3% para  $H_{b1} = 3.0$  m. <sup>d</sup> O Cenário C não contempla a existência de barra interna.

### Situação A

Esta situação considera uma situação média e persistente relativamente à agitação marítima, pretendendo representar as condições médias anuais vigentes na área considerada. Do ponto de vista morfológico a praia é analisada tendo por base uma subdivisão em três zonas já descritas, relativas à rebentação. Os resultados obtidos estão expressos na tabela 7.8..

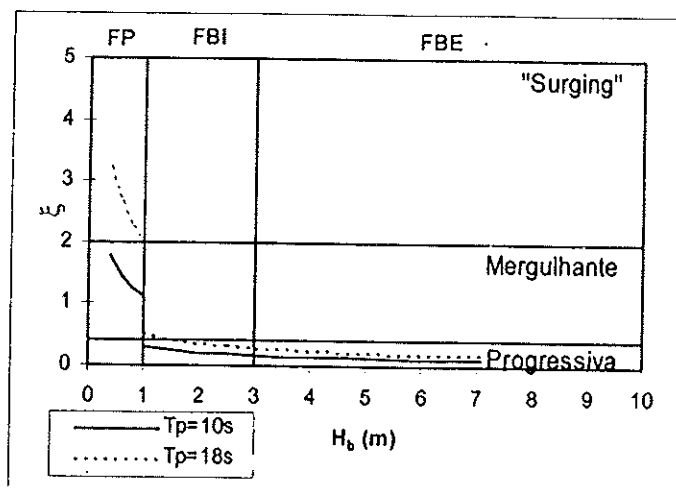
**Tabela 7.8.** Comportamento morfodinâmico da área de estudo para condições médias anuais, de acordo com a Situação A.

	$\xi_b$	Tipo de rebentação	$\varepsilon$	$\Omega$	Comportamento da praia
Face da barra externa	0.18	Progressiva	97.7	6.6	Dissipativa
Face da barra interna	0.27	Progressiva	41.7	2.1	Dissipativa a Intermédia
Face da praia	1.42	Mergulhante	1.6	1.0	Reflectiva

### Situação B

Nesta situação, pretendem-se observar as variações no comportamento de uma praia tipo (face da praia, barra interna e barra externa) relativamente a diferentes condições de agitação ( $H$ ,  $T$ ), admitindo-se variabilidade na altura da onda incidente, entre zonas, por efeito de dissipação de energia da onda na rebentação.

Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 7.10. e 7.11., sendo observável o predomínio das condições de agitação progressiva sobre as barras externa e interna e do tipo mergulhante sobre a face da praia. Não é credível a existência de ondas com  $T_p = 18$  s e altura associada  $H_b < 1.0$  m, pelo que não deverá ocorrer rebentação do tipo "surging".



**Figura 7.10.** Condições de rebentação para a Situação B, por sectores. FBE - Face da barra externa; FBI - Face da barra interna; FP - Face da praia.

O comportamento da praia submersa é sobretudo dissipativo, enquanto que na praia emersa predominam as condições reflectivas. É de assinalar que, utilizando os parâmetros  $\xi_b$  e  $\varepsilon$  (dependentes do declive) a principal variação de comportamento se efectua na transição barra interna/face da praia, enquanto que recorrendo ao parâmetro de Dean, essa transição ocorre entre as duas barras (devido ao condicionamento deste

parâmetro pela dimensão das partículas). As observações de campo parecem apontar para um comportamento da barra interna como correspondendo a uma zona de transição, com carácter intermédio. O esclarecimento efectivo desta situação só poderá ser efectuado através da análise de um conjunto mais vasto de dados relativamente à morfologia e granulometria da barra interna.

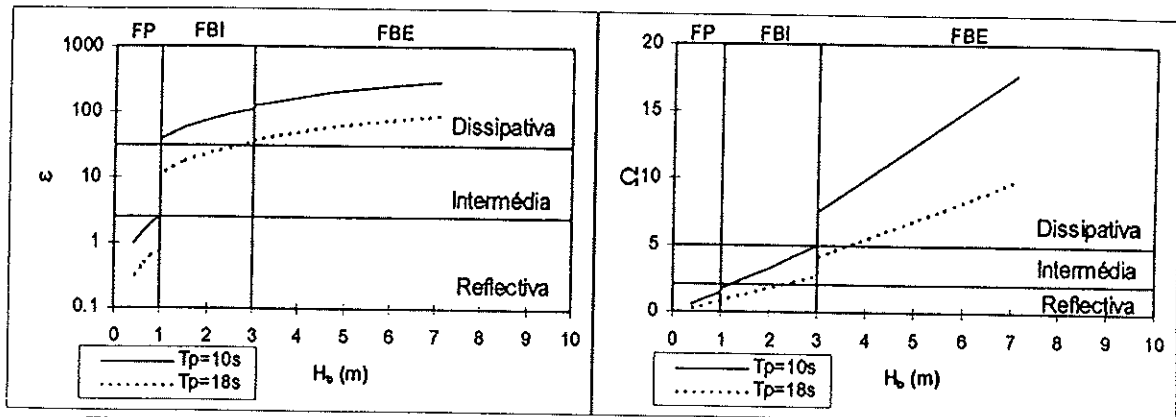


Figura 7.11. Comportamento morfodinâmico dos vários sectores da praia, na área de estudo, de acordo com a Situação B.

### Situação C

Na última situação escolhida a barra interna não existe, por translação total para a zona de praia emersa, dando origem à formação de uma ou mais bermas.

Relativamente à barra externa, mantêm-se as mesmas condições dissipativas e de rebentação progressiva, enquanto que a face da praia possui rebentação genericamente mergulhante, com comportamento intermédio para ondas de maior porte e menor período e reflectivo para ondas menores e/ou períodos maiores (figuras 7.12. e 7.13.).

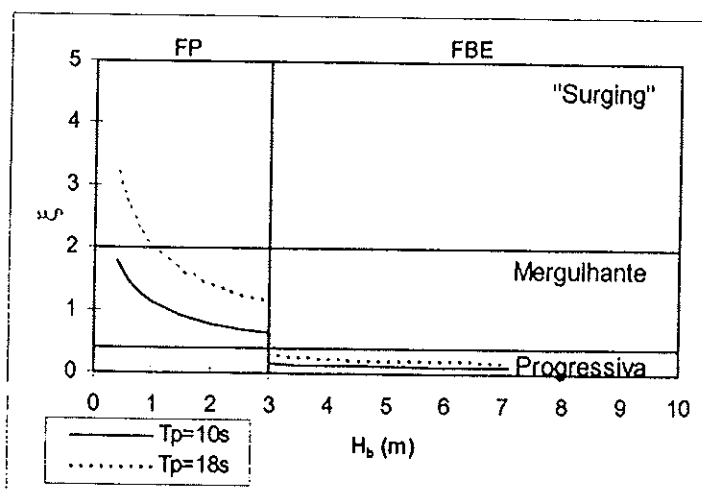


Figura 7.12. Tipo de rebentação nos sectores de praia considerados para a Situação C.

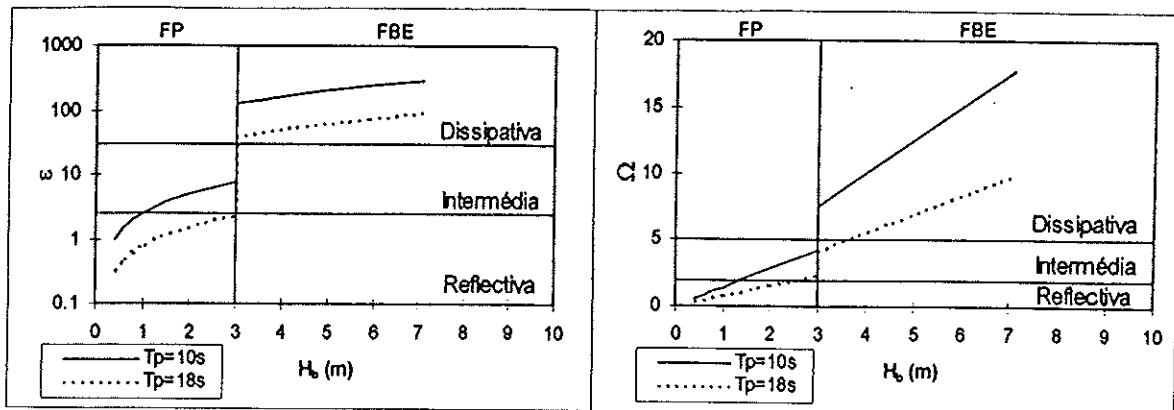


Figura 7.13. Comportamento morfodinâmico da praia, por sectores, na área de estudo, para as condições da Situação C.

De uma forma geral, poderá concluir-se que a área em estudo, anteriormente caracterizada como possuindo comportamento morfodinâmico intermédio (Ferreira *et al.*, 1994; Teixeira, 1994; Tomás, 1995) possui efectivamente três zonas de características distintas: i) face da barra externa, com rebentação progressiva e carácter francamente dissipativo; ii) face da barra interna, com rebentação progressiva tendendo para mergulhante (com a diminuição de  $H$  ou com o aumento de  $T$ ) e carácter dissipativo a intermédio; iii) face da praia, com carácter reflectivo e rebentação mergulhante predominante. Na inexistência de barra interna a face da praia efectua igualmente a zona de transição, possuindo carácter intermédio a reflectivo.

O comportamento evidenciado já tinha sido descrito, ainda que superficialmente, por Ferreira *et al.* (1994) ao ser apontado que a praia emersa se comportaria genericamente de forma reflectiva, enquanto que na praia submersa deveriam predominar as características dissipativas e a correspondente atenuação da energia da onda, nomeadamente através da rebentação sobre barras longilitorais submersas.

## 7.5. VARIABILIDADE MORFOLÓGICA E VOLUMÉTRICA DA PRAIA EMERSA

### 7.5.1. Volumes sedimentares (“stocks”) da praia emersa

A globalidade dos perfis obtidos nos levantamentos que tiveram lugar entre Setembro de 1992 e Junho de 1993, nas campanhas MOLICEIRO, estão representados na figura 7.14., por local.

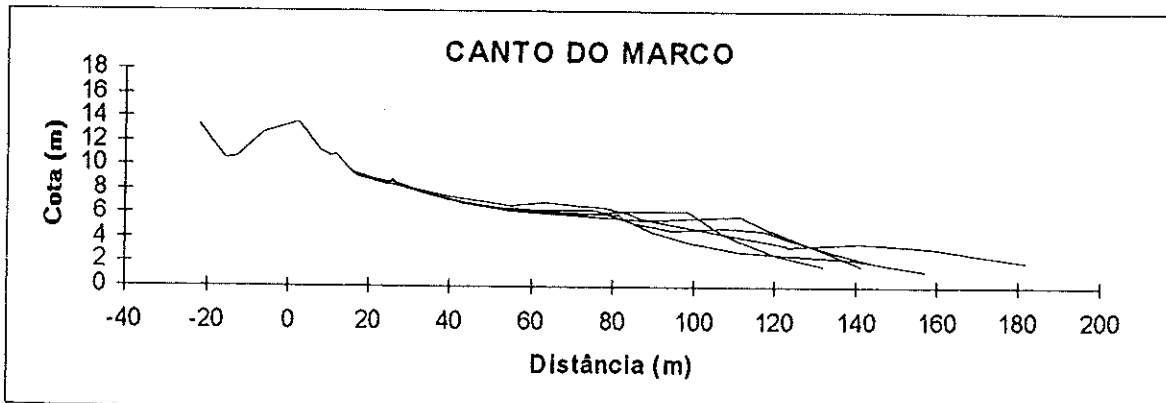
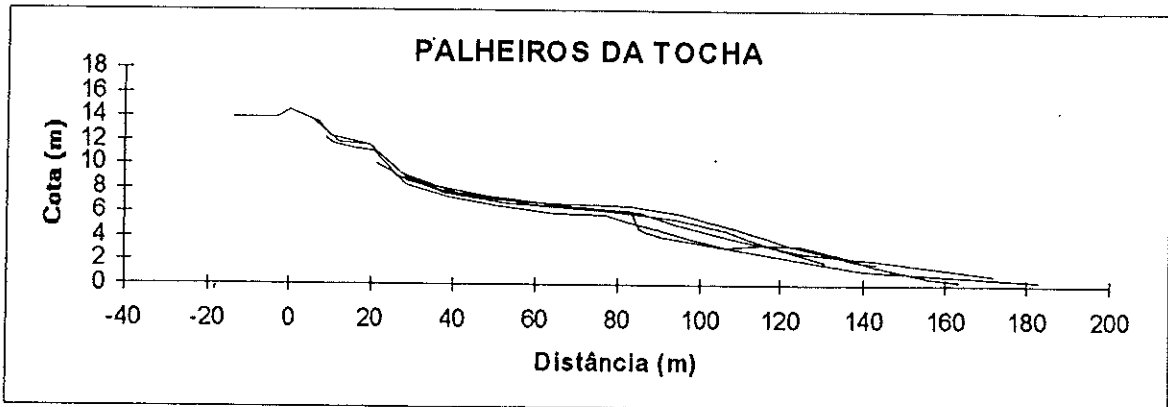
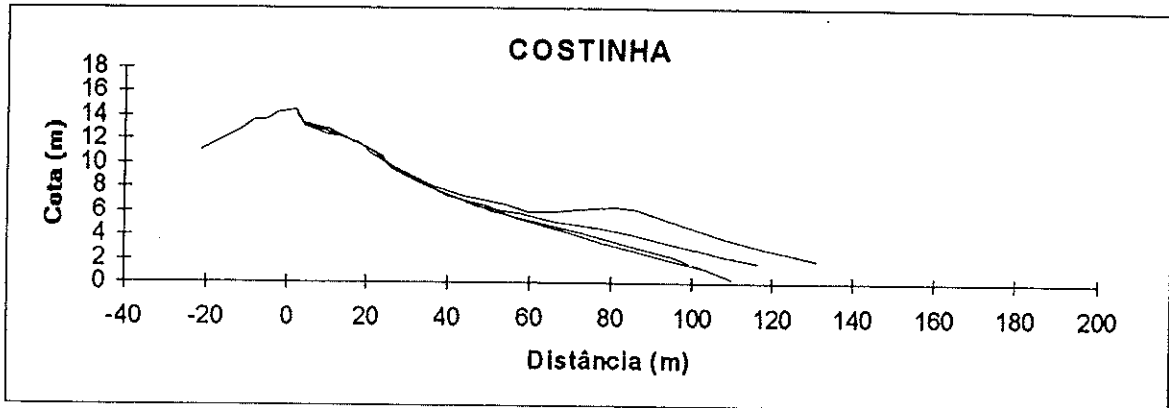
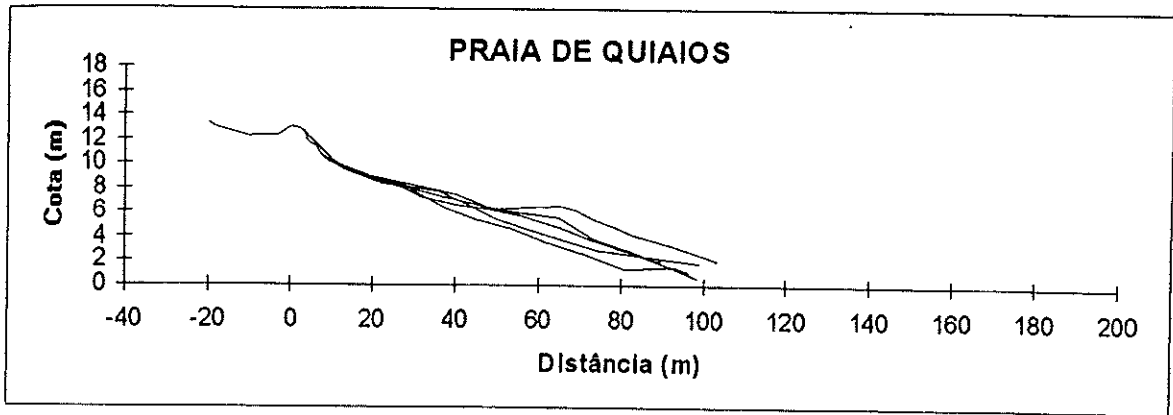


Figura 7.14. Perfis efectuados na área de estudo no período Set 92/Jun 93, referidos ao ZH (continua).

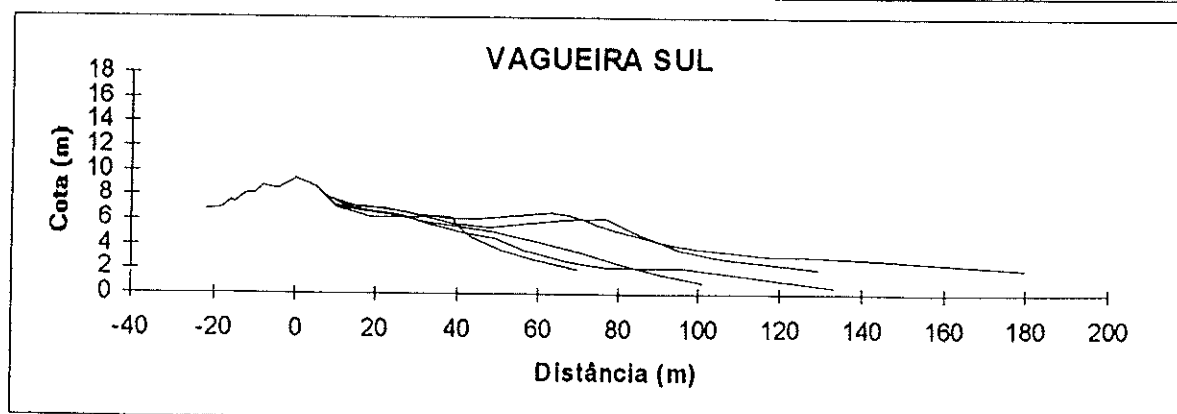
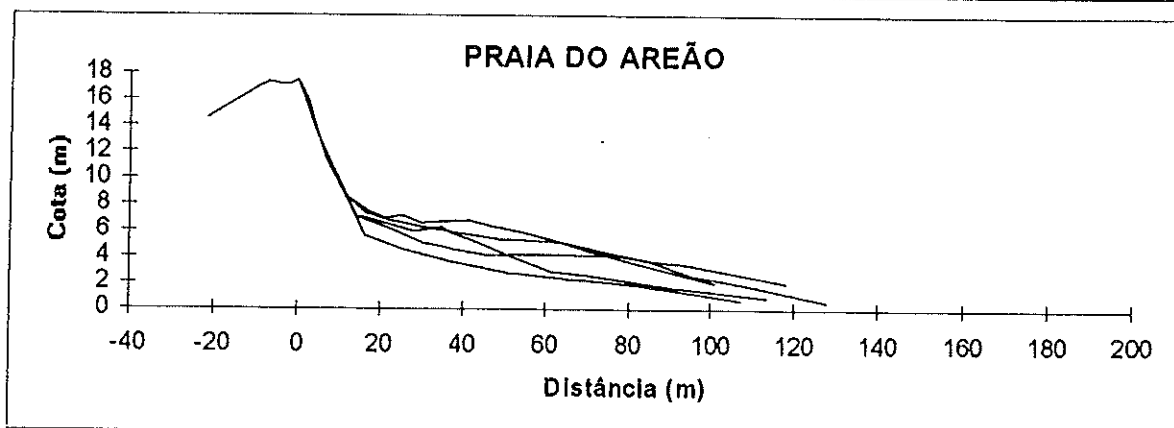
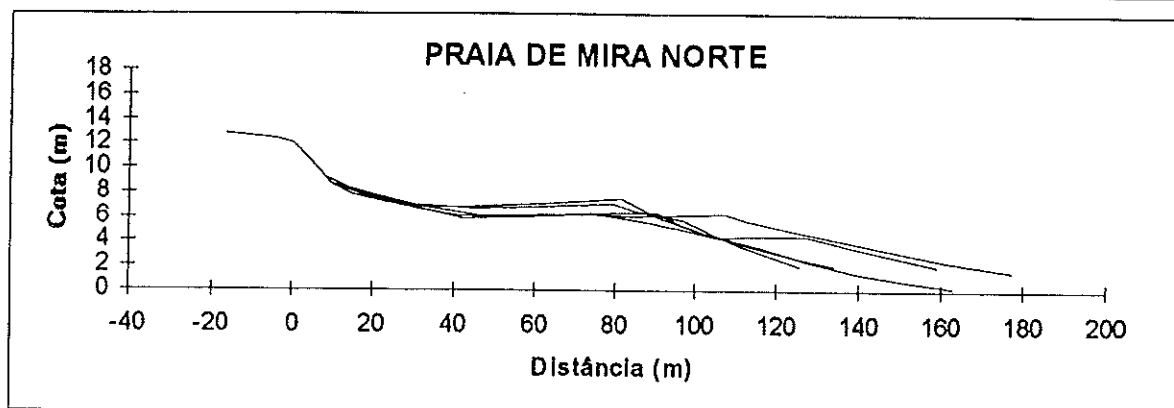
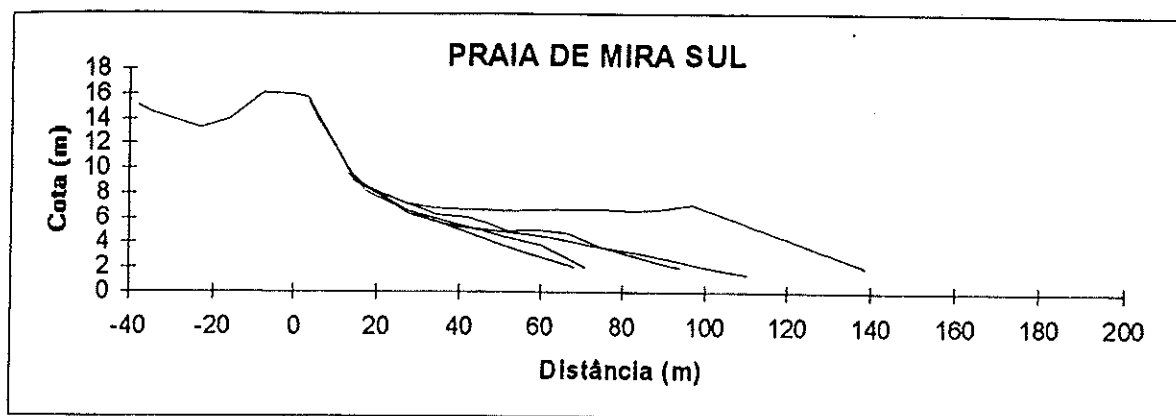


Figura 7.14. Perfis efectuados na área de estudo no período Set 92/Jun 93, referidos ao ZH (continua).

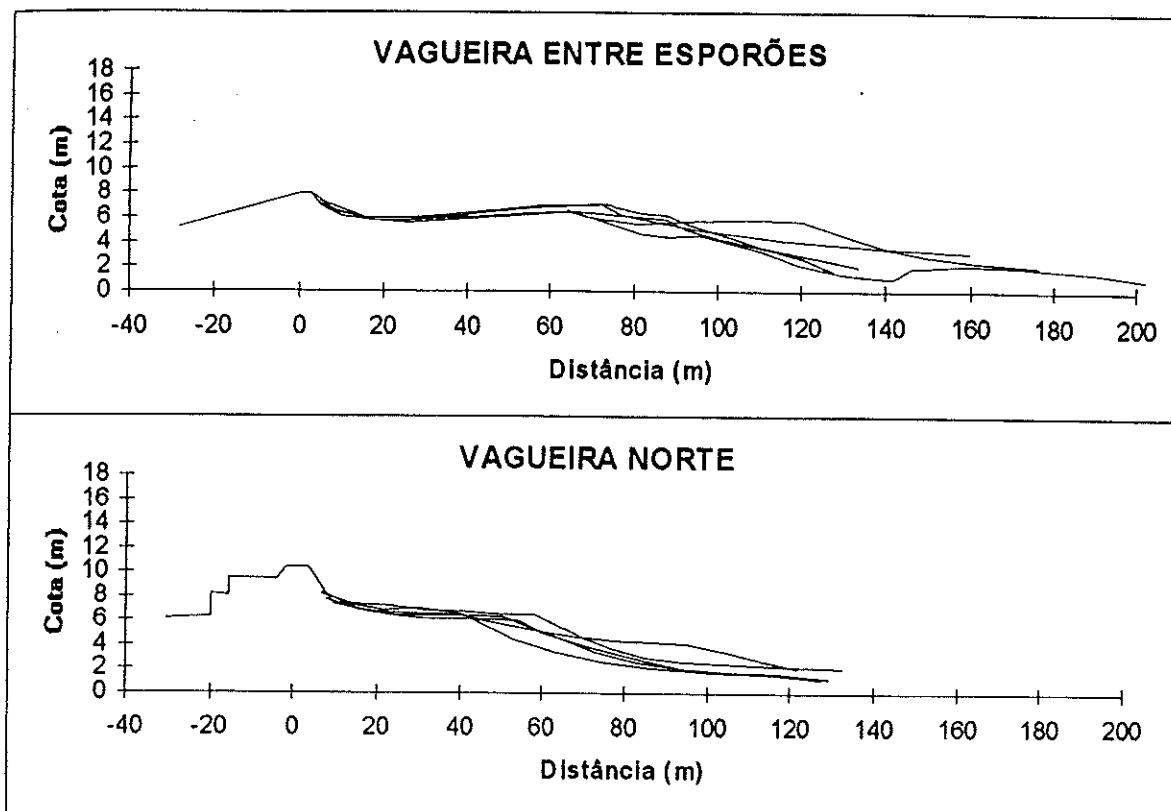


Figura 7.14. Perfis efectuados na área de estudo no período Set 92/Jun 93, referidos ao ZH.

A variabilidade da praia emersa foi estudada recorrendo ao cálculo dos volumes sedimentares (“stocks”) existentes acima do nível médio do mar (NMM), tendo como limite interno o ponto de não mobilidade relativa.

O conjunto de volumes sedimentares determinados para os 10 locais analisados, ao longo do período de estudo, é apresentado na tabela 7.9., onde se apontam, igualmente, os volumes médios e a máxima diferença entre volumes calculados, para cada praia e para a área de estudo no global.

Tabela 7.9. Volumes sedimentares em cada levantamento, volume médio e máxima diferença entre levantamentos, para a área de estudo, em m<sup>3</sup>/m. NE - Não efectuado.

Praia	Set/92	Dez/92	Fev/93	Mar/93	Jun/93	Volume médio	Diferença máxima
PQ	316.8	281.2	242.9	310.3	373.9	305.0	131.0
C	275.7	NE	284.8	323.9	429.8	328.6	154.1
PT	404.2	453.1	391.8	440.1	480.9	434.0	89.1
CM	407.9	375.3	329.6	396.7	455.1	392.9	125.5
PMS	182.1	202.7	272.1	251.5	529.8	287.6	347.7
PMN	488.5	559.7	441.3	497.5	480.3	493.5	118.4
PA	98.7	179.4	217.2	290.1	292.5	215.6	193.8
VS	169.4	217.1	190.5	357.5	424.3	271.8	254.9
VE	353.7	504.0	389.2	430.2	521.9	439.8	168.2
VN	265.9	278.6	231.3	351.8	333.8	292.3	120.5
Médias						346.1	170.3

Comparando os volumes médios obtidos, entre praias, e tendo como referência o local com maior volume médio (PMN com 493.5 m<sup>3</sup>/m), verifica-se que algumas praias (PMS, PA, VS e VN) apresentam volumes médios que são correspondentes a apenas cerca de metade do volume mais elevado. Pelo contrário, os locais PT, CM e VE apresentam valores mais aproximados ao de PMN, variando entre 80% e 89% deste.

Tendo por base os valores da tabela 7.9., elaborou-se a figura 7.15., onde é possível observar o volume sedimentar máximo, mínimo e médio, em cada local estudado. Encontram-se igualmente evidenciadas as posições relativas dos esporões existentes na área estudada e o sentido da deriva litoral, sendo visível que os volumes sedimentares mais baixos ocorrem em locais a sotamar dos esporões, isto é, a sul. É o que se verifica em Vagueira Sul, Praia do Areão e Praia de Mira Sul. Em contraste, alguns dos valores mais elevados ocorrem em praias localizadas a bañamar (norte) de esporões.

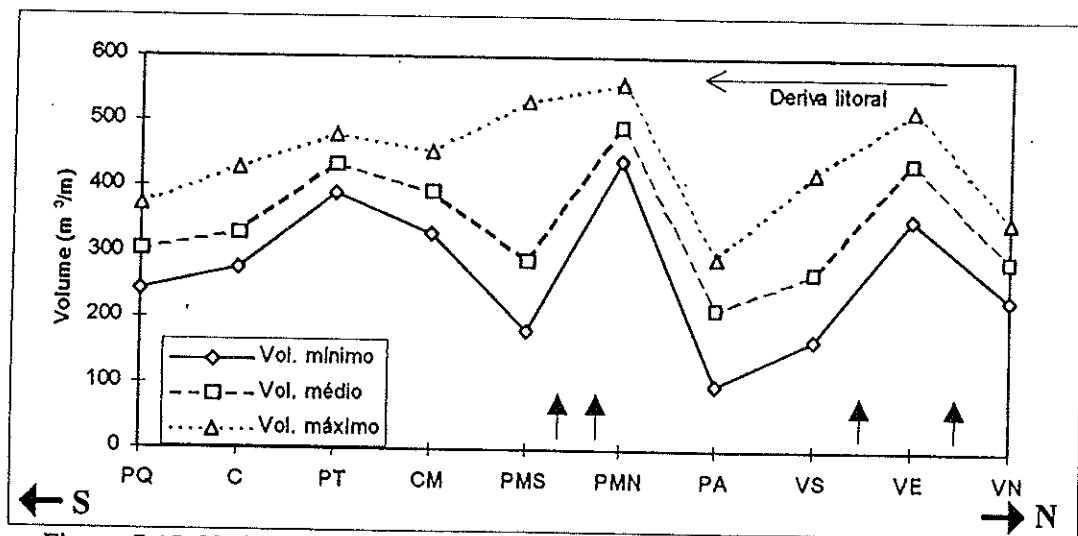


Figura 7.15. Variação longitudinal do volume sedimentar ao longo da área de estudo. As setas verticais indicam a localização relativa dos esporões.

É importante referir que o volume máximo mais elevado (PMN) foi cerca de duas vezes superior ao menor volume máximo (PA), o que revela bem as diferenças existentes entre praias relativamente às suas máximas capacidades de defesa. Esta diferença torna-se ainda maior considerando o volume mínimo, visto que para as mesmas praias ocorre uma diferença entre volumes de 4.5 vezes. Se atendermos a que estes locais distam apenas cerca de 7 km um do outro e que o regime de agitação é o mesmo, é fácil concluir da muito maior fragilidade da praia com menor volume

sedimentar armazenado (PA). Esta fragilidade é, provavelmente, resultado das actuais condições de fornecimento sedimentar já caracterizadas por Ferreira (1993). As acções induzidas pelos molhes de Aveiro e pelos esporões de Costa Nova do Prado, Vagueira e Praia de Mira não permitem que se verifique o fornecimento sedimentar natural, registando-se um notório enfraquecimento na robustez das praias a sotamar destas estruturas. Esse enfraquecimento é observável em longas extensões (Costa Nova do Prado - Vagueira; Vagueira - Barra de Mira; Praia de Mira - Canto do Marco), sendo apenas interrompido esporadicamente a norte de estruturas transversais (ex.: Vagueira e Praia de Mira) e inexistente a sul de Canto do Marco onde a deriva litoral efectiva se aproxima da potencial, devido ao transporte de sedimentos erodidos das dunas e das praias localizadas a norte.

#### 7.5.2. Variabilidade entre períodos de observação

Tendo por base os volumes sedimentares obtidos, calculou-se a variação existente entre cada período de observação, através da diferença simples entre volumes. Os valores obtidos estão expressos na tabela 7.10., sendo os valores negativos correspondentes a erosão e os positivos a acreção. Apresenta-se, ainda, a variação média por período para a globalidade da área e a variação total final em cada praia e na área de estudo, considerando uma extensão total de 50 km e os perfis obtidos como representativos da média da área.

**Tabela 7.10.** Diferença volumétrica entre levantamentos consecutivos (os valores negativos indicam erosão e os positivos acreção).

Praias	Set92/Dez92	Dez92/Fev93	Fev93/Mar93	Mar93/Jun93	Set92/Jun93
PQ	-35.6	-38.3	67.4	63.6	14.3
C	*	9.1**	39.1	105.9	36.3
PT	49.1	-61.3	48.3	40.8	19.2
CM	-32.6	-45.7	67.1	58.4	11.8
PMS	20.6	70.0	-20.6	278.3	87.1
PMN	71.2	-118.4	56.2	-17.2	-2.1
PA	80.7	37.8	72.9	2.4	48.5
VS	47.7	-26.6	167.0	66.1	63.6
VE	150.3	-114.8	41.0	91.7	42.1
VN	12.7	-47.3	120.5	-18.0	17.0
Média	40.5	-38.3	65.9	67.2	33.8
Vol. total (m <sup>3</sup> x10 <sup>6</sup> )	2.0	-1.9	3.3	3.4	1.7

\* Não calculado por inexistência de levantamento em Dez 92. \*\* Set92/Fev93.

Analisando os valores expressos, verifica-se um comportamento próximo do esperado, com a existência de um período com tendência global de erosão, entre Dezembro de 1992 e Fevereiro de 1993 (Inverno), sendo os restantes de acreção. A acreção registada entre Fevereiro e Junho de 1993 representa a transição de condições para uma situação de Verão. Para o período de Setembro de 1992 a Dezembro de 1992, seria de esperar um comportamento erosivo, por passagem de condições de Verão para condições de Inverno marítimo, e pela altura média da onda relativamente elevada que se registou nesse período. Contudo, tal não aconteceu devido à existência generalizada de um perfil inicial (Setembro de 1992) de erosão, provavelmente originado por uma agitação relativamente energética ( $H_{so} = 4.4$  m) próxima de marés vivas, em 22/9/92, três dias antes do levantamento. Assim, aquele que seria um esperado “perfil de Verão” inicial, evidenciou-se como sendo um perfil de erosão, denotando alguma inconformidade relativamente à classificação sazonal, visto que a acontecimentos de mesoescala (alguns dias ou horas) podem corresponder alterações tão elevadas como as verificadas à macroescala (meses a ano). Este tipo de situação foi já observado por alguns autores em outros locais da costa portuguesa (Martins *et al.*, 1996; Gama, 1997), levando a uma maior incerteza na interpretação dos perfis. Stauble (1992) afirma que a variação de longo termo na forma do perfil é função da frequência das variações induzidas por temporais e que é a variação cíclica nesta frequência que leva à existência de um ciclo sazonal de erosão típica no Inverno e de acreção no Verão. Assim sendo, a qualquer alteração nessa frequência, ou nesse regime, corresponderá uma alteração no ciclo mencionado.

A nível global, entre o primeiro e o último levantamento, registou-se um acréscimo sedimentar de  $33.8 \text{ m}^3/\text{m}$ , isto é, cerca de  $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  para a totalidade do sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego, considerando os locais escolhidos como sendo representativos da totalidade do sector. Este valor é apenas relativo ao período de análise e não pode ser considerado como um comportamento global da área em questão. Usando o mesmo pressuposto, foi determinado o volume acrecionado ou erodido, por transferência perpendicular à praia, entre cada levantamento, para o referido sector costeiro. Este valor variou entre  $-1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Dez92/Fev93) e  $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Mar93/Jun93), indicando transferências da ordem da deriva litoral admitida para a região, cerca de  $1.5$  a  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  (Oliveira *et al.*, 1982; Ferreira, 1993; Taborda, 1993; Teixeira, 1994), em períodos bastante mais reduzidos. Estes valores vêm

comprovar a enorme importância das variações sedimentares transversais entre a praia emersa e submersa na evolução deste sector costeiro, evidenciando que a estabilidade das praias depende, fortemente, da continuidade destas trocas. Como tal, qualquer acção que possa colocar em causa estas transferências sedimentares poderá igualmente contribuir para um aumento da erosão costeira.

### 7.5.3. Comportamento comparado entre praias

Com vista à comparação do comportamento entre os vários locais, relativamente à variação volumétrica sofrida no período de análise, recorreu-se ao método de correlação comparando o comportamento dos locais, dois a dois, e utilizando para tal a série de volumes obtidos entre os sucessivos levantamentos. Este método foi já desenvolvido por outros autores, referindo-se a título exemplificativo o trabalho de Alonso e Vilas (1994), pela semelhança com o estudo aqui efectuado. Deste procedimento resultou a elaboração de uma matriz de índices de correlação, expressa na tabela 7.11.. Uma dificuldade de aplicação deste método à área em estudo foi a existência de apenas cinco levantamentos, fazendo com que os resultados tenham por base um número reduzido de pontos. A inexistência de levantamento em Dezembro de 1992, para o local Costinha, não permitiu que este local fosse comparado em termos do seu comportamento, com os demais analisados.

**Tabela 7.11.** Matriz de correlação da variação volumétrica entre locais estudados.

	PQ	C	PT	CM	PMS	PMN	PA	VS	VE	VN
Praia de Quiaios	1.00									
Costinha	*	1.00								
Palheiros da Tocha	0.56	*	1.00							
Canto do Marco	1.00	*	0.62	1.00						
Praia de Mira S	0.34	*	0.02	0.29	1.00					
Praia de Mira N	0.31	*	0.92	0.39	-0.35	1.00				
Praia do Areão	-0.32	*	0.27	-0.25	-0.94	0.61	1.00			
Vagueira S	0.79	*	0.76	0.83	-0.25	0.74	0.33	1.00		
Vagueira E	0.26	*	0.92	0.32	0.11	0.86	0.23	0.46	1.00	
Vagueira N	0.57	*	0.62	0.61	-0.56	0.72	0.59	0.94	0.31	1.00

\* Correlação não efectuada por escassez de pontos.

Admitiram-se como possuindo tendência de variação semelhante locais que entre si apresentassem valores de  $r > 0.5$ . A escolha deste valor resulta do escasso número de coeficientes de correlação positivos elevados, visto que em 36 correlações

estabelecidas apenas 7 possuíram um valor de  $r > 0.75$  e 16 um valor  $r > 0.5$ . Existem vários coeficientes com valor negativo, indicando alguma variabilidade na área em questão. Tal não é de estranhar, atendendo à própria variabilidade natural de local para local, e que aos locais escolhidos correspondem diferentes situações (estando alguns directamente afectados por estruturas costeiras), pretendendo abarcar a totalidade das existentes na área de estudo.

Para se determinar quais as praias com comportamento médio similar, contabilizou-se, para cada uma, o número de relações com  $r > 0.5$ . O comportamento global da zona costeira em questão pode ser descrito pelo comportamento de um grupo composto por praias naturais (PQ, PT, e CM) e por praias a norte de esporões (PMN e VN), ao qual se junta uma excepção (VS), possuindo esses locais entre 4 e 6 coeficientes de correlações acima de  $r = 0.5$ . Três das praias analisadas não possuíram comportamento semelhante às restantes, denominando-se como locais "anómalos":

Praia do Areão - zero correlações com coeficiente superior a 0.5, situada 5 km a sotamar dos esporões da Vagueira e sofrendo acentuado recuo;

Praia de Mira Sul - zero correlações com coeficiente superior a 0.5, situada a sotamar dos esporões de Praia de Mira e em franco recuo;

Vagueira entre esporões - duas correlações com coeficiente superior a 0.5, localizada entre dois esporões.

Os locais ditos "anómalos" (VE, PMS e PA) não se encontram correlacionados entre si de forma significativa, não podendo ser considerados como um grupo ou uma tipologia de comportamento.

Apesar do reduzido número de levantamentos e dos baixos valores de coeficientes positivos encontrados, o método parece possuir potencial para avaliar comportamentos comparados, determinando locais com tendências semelhantes e podendo ser aplicado como forma expedita de determinar relações de comportamento entre diferentes locais.

#### 7.5.4. Variabilidade volumétrica das bermas

As bermas existentes na parte emersa da praia são, provavelmente, o mais importante aspecto morfológico deste sector da praia, sendo responsáveis por uma maior ou menor capacidade de resposta da praia à agitação incidente, através da sua

erosão e transporte para o largo. A sua reposição, em condições de agitação menos energética, é evidenciadora de uma capacidade de regeneração da praia, bem como da existência de sedimento disponível na praia submersa. A velocidade dessa recuperação depende, para além das características do sedimento disponível, das condições de agitação e do tipo de praia. Assim, em praias reflectivas o transporte sedimentar para terra pode ser da ordem das dezenas de  $m^3/m/dia$ , como acontece por exemplo na Praia de Faro - Algarve (Martins *et al.*, 1996). Em praias dissipativas, como em alguns exemplos da Costa Sudoeste ou do Algarve, a recuperação é bastante mais lenta e da ordem das dezenas  $m^3/m/mês$  (Gama, 1997). No sector em estudo, a velocidade de recuperação da parte emersa deverá ser intermédia relativamente a estas duas situações, isto é, dezenas de  $m^3/m/semana$ , o que parece ser comprovado pelas observações efectuadas nas várias campanhas que servem de base a esta dissertação.

Para cada perfil obtido foi calculado o volume da(s) berma(s) existente(s), de acordo com a representação gráfica que consta da figura 7.16.. Para tal, foi necessário estabelecer linhas de base entre os dois limites interno e externo de cada berma. Como limites foram considerados os locais onde ocorriam rupturas acentuadas de pendor.

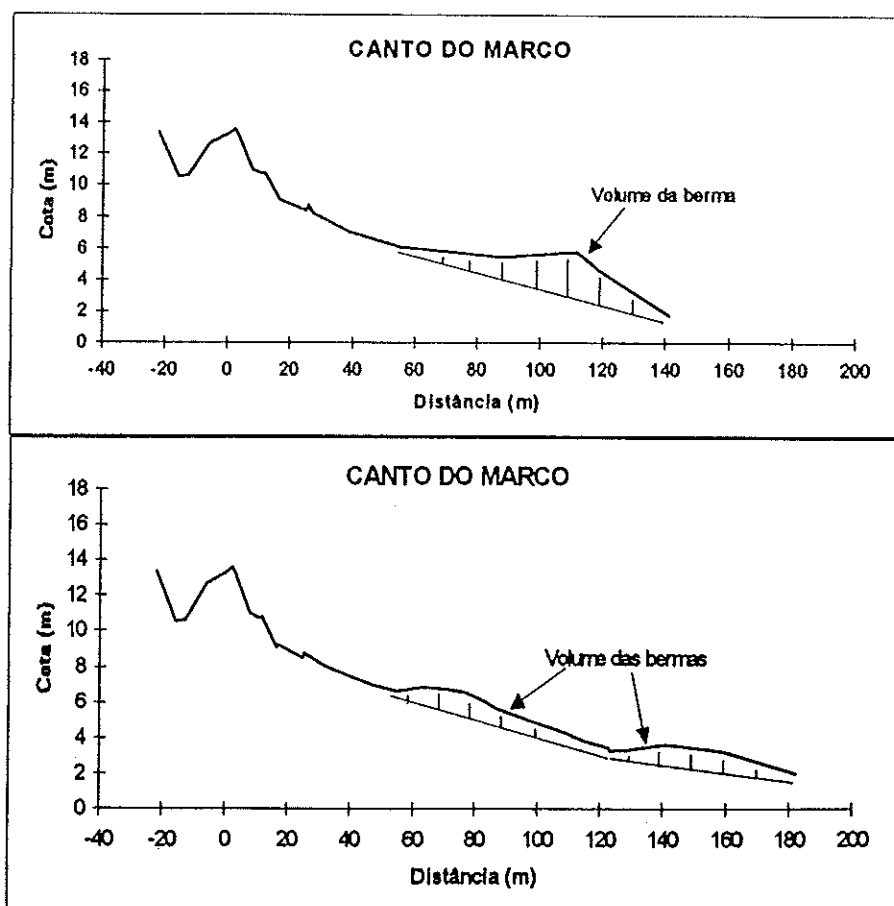


Figura 7.16. Representação esquemática dos volumes calculados para praias com uma berma (gráfico superior) e com duas bermas (gráfico inferior).

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 7.12. e na figura 7.17., onde são observáveis os volumes de berma mínimos, médios e máximos, para cada local. A existência de valores iguais a zero representa perfis planares ou côncavos, onde não ocorria qualquer berma, mesmo que incipiente.

Como conclusões da análise dos resultados obtidos, verifica-se que os locais VS, PA, e PMS possuíram volumes nulos ou próximos de tal, evidenciando a possibilidade de inexistência total de berma, isto é, de perfil de erosão típico. Nos restantes locais, para as observações efectuadas, tal nunca se verificou, podendo referir-se que predomina o perfil típico de acreção com a presença de pelo menos uma berma. As três praias com valores mais baixos correspondem a três locais situados a sul de esporões e em recuo acentuado.

Tabela 7.12. Volumes da berma por levantamento; volume médio e máxima diferença para cada local.

Praia	Set92	Dez92	Fev92	Mar93	Jun93	Volume médio	Diferença máxima
PQ	16.3	10.7	5.1	15.9	27.0	15.0	21.9
C	14.2	---	20.8	21.5	60.6	29.3	46.4
PT	31.9	40.9	49.8	47.9	60.0	46.1	28.1
CM	58.6	50.7	25.2	39.0	47.1	44.1	33.4
PMS	0.0	3.3	11.8	7.8	106.9	26.0	106.9
PMN	42.3	119.2	120.4	126.0	83.4	98.3	83.7
PA	0.0	14.2	40.9	7.5	19.8	16.5	40.9
VS	27.9	10.7	1.1	58.1	40.3	27.6	57.0
VE	52.0	83.2	52.9	104.0	133.8	85.2	81.8
VN	48.8	44.6	22.5	24.2	47.1	37.4	26.3
Médias						42.5	52.6

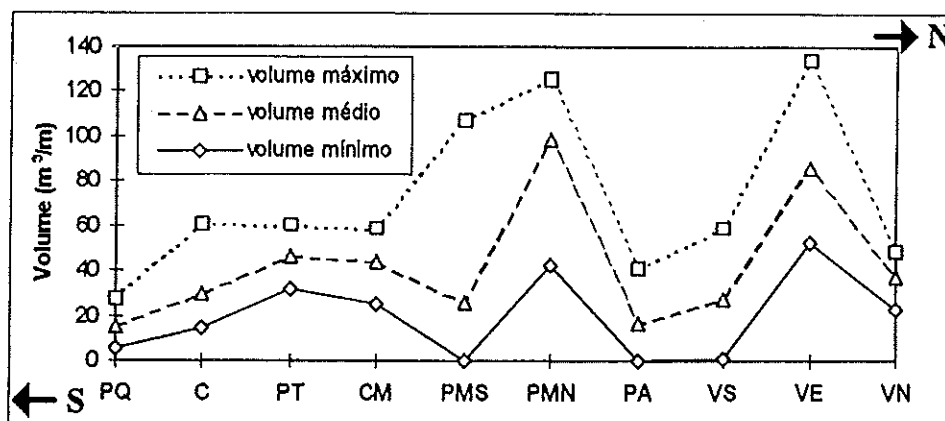


Figura 7.17. Variação longitudinal do volume da berma na área de estudo.

Pela análise do gráfico é igualmente evidente a existência de uma menor

variabilidade entre volumes máximo e mínimo para as praias a sul do Canto do Marco (inclusive), o que poderá ser entendido como sinal de relativa estabilidade.

A existência, permanente, de uma berma com volume sedimentar pouco elevado em Praia de Quiaios poderá estar relacionada com a possível ocorrência de um menor volume sedimentar disponível na praia emersa, por efeito de afloramentos rochosos relacionados com a estrutura do Cabo Mondego. Tal parece reflectir-se, igualmente, na largura da praia emersa, geralmente inferior à das praias que se localizam imediatamente a norte.

## 7.6. ÍNDICES DE VULNERABILIDADE MORFOLÓGICA

### 7.6.1. Introdução e conceitos

Não existem, na literatura, índices simples com base em critérios morfológicos, que permitam avaliar da maior ou menor capacidade de resposta de uma praia relativamente à acção de agitação energética, tendo por base uma aproximação de macroescala. Existem aproximações ao transporte sedimentar e à variabilidade morfológica mas a escalas menores (micro e mesoescala), não sendo provavelmente válida uma simples integração dessas aproximações no espaço e no tempo por forma a obter resultados numa escala superior (Larson e Kraus, 1995). De acordo com estes autores, abordagens com sucesso, para a caracterização do transporte sedimentar e da variabilidade morfológica em escalas maiores, terão de incluir figuras chave da morfologia de larga escala. Foi neste sentido que se desenvolveu o estudo apresentado neste sub-capítulo, tendo como objectivo final a obtenção de índices capazes de indicar a vulnerabilidade morfológica de determinada praia emersa, considerando como vulnerabilidade a maior ou menor capacidade de cada praia para suportar condições de agitação marítima adversas. Assim, uma praia de elevada vulnerabilidade poderá também ser referida como frágil, dada a sua entrada em ruptura ou possibilidade de recuo efectivo para condições energéticas elevadas. Uma praia de baixa vulnerabilidade, também referida como robusta, não apresentará recuo efectivo, mesmo sofrendo erosão pontual. Entende-se como recuo efectivo, a remoção da totalidade das estruturas de defesa da praia emersa (berma e alta praia), com ataque do cordão dunar, da arriba ou de estruturas edificadas na parte superior da praia.

A aplicação dos índices pressupõe que a variabilidade existente ao longo de um perfil seja, na globalidade, dependente das trocas perpendiculares à praia e que, após um ciclo anual, a morfologia da praia emersa se mantém relativamente constante, independentemente de existir ou não recuo efectivo do corpo dunar ou da arriba adjacente. Isto é, que haja uma tendência de sazonalidade no comportamento do perfil de praia emersa. Desta forma, o conceito principal deste tipo de índices consiste em assumir que a variabilidade anual da praia pode ser um indicador do seu comportamento futuro.

Para obter o índice de vulnerabilidade morfológica ( $I_V$ ), é necessário calcular o volume da praia acima do nível médio do mar, para cada perfil obtido. O limite interno considerado, para esses cálculos, corresponde ao ponto para o interior do qual não se observou qualquer movimento de areia por acção marinha ("ponto de não-mobilidade relativa"). Com base nos volumes obtidos, podem calcular-se volumes médios ( $V_{med}$ ) para cada praia ou local e para o período desejado. O índice de vulnerabilidade morfológica é, então, dado por:

$$I_V = (V_{max} - V_{min}) / (V_{med}) \quad (7.5)$$

onde  $V_{max}$  e  $V_{min}$  são os volumes máximos e mínimos obtidos para os levantamentos efectuados no período escolhido. Um valor elevado do índice indica uma variação elevada do volume da praia (um local dinâmico) e/ou volumes médios genericamente baixos. Desta forma, índices elevados serão indicativos de costas vulneráveis à erosão.

#### 7.6.2. Aplicação do índice

Por forma a obter uma aplicação e uma determinação do índice mais abrangente, optou-se por estudar 15 locais, em dois sectores costeiros portugueses distintos e contrastantes no que se refere à energia associada à agitação incidente. Esses sectores são: a Praia de Faro, Algarve, onde se estudaram 5 locais com levantamentos mensais efectuados entre Maio de 1995 e Maio de 1997 (campanhas VASA); e a área em estudo nesta dissertação (Aveiro - Cabo Mondego), com os levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993 (campanhas MOLICEIRO). Todas as praias analisadas correspondem a praias expostas com

comportamento morfodinâmico entre o reflectivo e o intermédio, estando a principal diferença entre sectores na energia das ondas incidentes, sendo o sector algarvio correspondente a energia moderada e a costa oeste a energia elevada.

Após o cálculo dos volumes e do teste de  $I_V$  para várias situações, verificou-se que o índice apenas apresentava resultados estáveis quando se incluísse na sua determinação um conjunto de dados representativo de um ciclo sazonal completo (Verão/Inverno), com períodos entre levantamentos sucessivos que não excedesse os 2 meses.

A figura 7.18. ilustra a evolução de  $I_V$  ( $I_{Vn_i}/I_{Vn_{i-1}}$ ) com o aumento do número de perfis ( $n_i$ ) utilizados no cálculo de  $I_V$ . Esta figura mostra que a taxa de incremento do índice estabiliza quando o número de perfis utilizados ( $n_i$ ) é superior a 12/13 (um ano de observações mensais). Tendo por base estes resultados,  $I_V$  é calculado para cada local utilizando um ano inteiro de levantamentos, indicando o comportamento da praia nesse período.

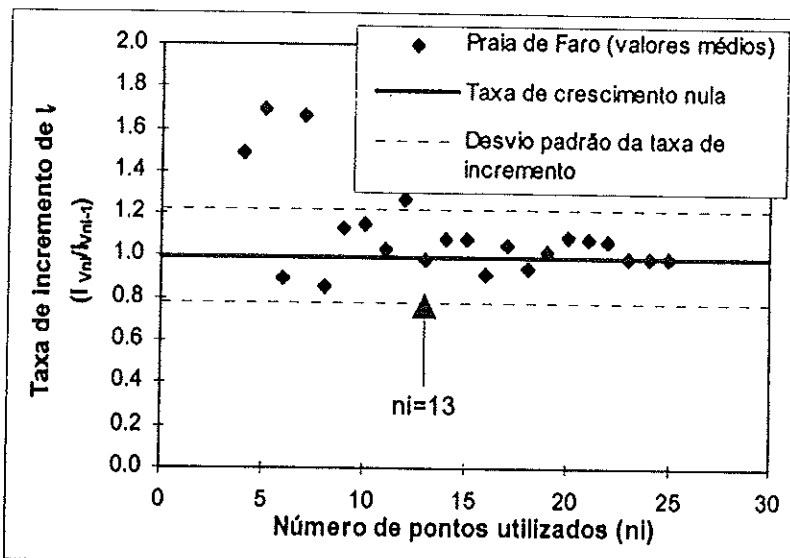


Figura 7.18. Variação da taxa de incremento em função do número de pontos utilizado para cada cálculo de  $I_V$ , para a Praia de Faro.

#### 7.6.2.1. Aplicação à Praia de Faro

A aplicação da equação 7.5 aos dados da Praia de Faro (figura 2.1.) permitiu a obtenção de 13 valores do índice de vulnerabilidade, para cada local, desde o conjunto dos meses 1-13 (primeiro ano de levantamentos) até aos meses 13-25 (último ano de levantamentos). Os valores mínimos, máximos e médios obtidos para cada local estão expressos na tabela 7.13..

Tabela 7.13. Valores de  $I_v$  para a Praia de Faro.

$I_v$	Local A	Local B	Local C	Local D	Local E
Média	0.38	0.62	0.36	0.29	0.27
Max	0.41	0.69	0.44	0.34	0.34
Min	0.34	0.54	0.23	0.22	0.17

Da análise desta tabela ressalta que o local B é o mais vulnerável à erosão. Tal está de acordo com as observações efectuadas no campo, nomeadamente com a frequente ocorrência de galgamentos neste local, coincidente com o parque de estacionamento da Praia de Faro. Das observações de campo é ainda evidente que os locais A e C são menos robustos que D e E, verificando-se erosão da duna no local A (com danificação das casas sobrepostas) e galgamento e destruição do muro de protecção no local C. Pelo contrário, nos locais D e E as dunas não têm sido afectadas pelo espraio. As conclusões obtidas pela análise da tabela 7.13. são genericamente concordantes com as expressas noutros trabalhos desenvolvidos para o mesmo local (Martins *et al.*, 1996, 1997; Ferreira *et al.*, 1997) utilizando métodos de avaliação diferentes.

A figura 7.19. mostra a variabilidade dos valores de  $I_v$  obtidos para os locais B e E, para o período observado. A diferença de comportamento entre locais é evidente, apresentando o local B valores de  $I_v$  significativamente superiores aos do local E.

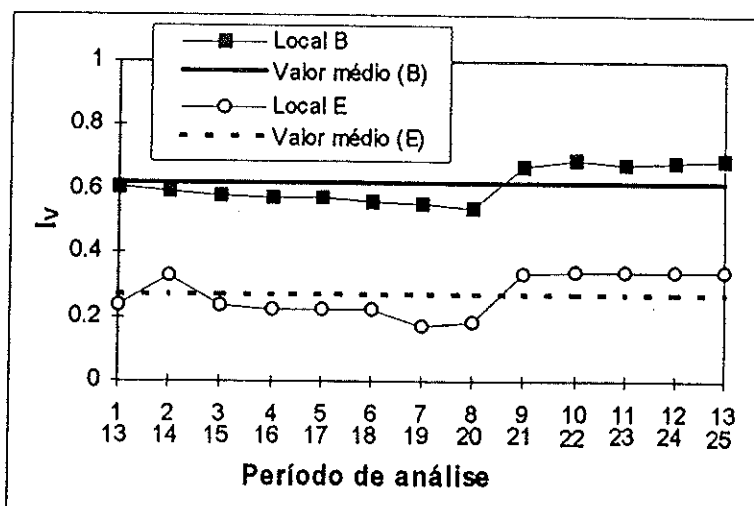


Figura 7.19. Variação do índice para os locais B e E da Praia de Faro, desde o período inicial (meses 11 a 13) até ao período final (meses 13 a 25).

Sabendo-se que as dunas em D e E não evidenciaram erosão e que nos locais A, B e C ocorrem frequentemente galgamentos, erosão e/ou danificações, é possível inferir um limite de robustez de 0.35, acima do qual a erosão costeira se tornará mais

frequente. Na figura 7.20. apresenta-se a relação entre os valores do índice calculados nos diferentes locais relativamente a este limite empírico.

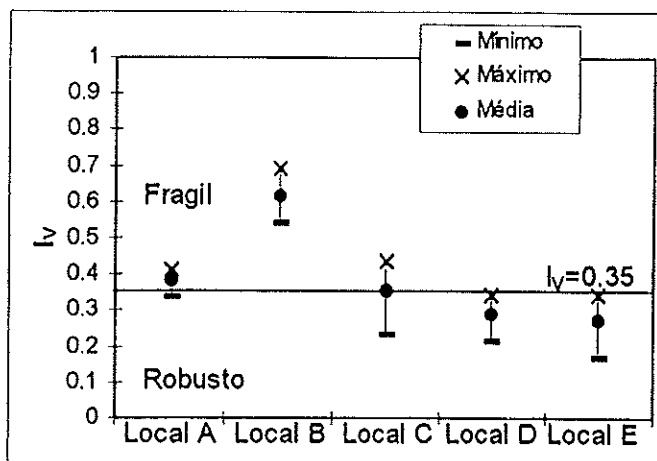


Figura 7.20. Variabilidade do índice no período de análise, para cada local da Praia de Faro, e sua relação com o limite empírico.

#### 7.6.2.2. Aplicação aos dados de Aveiro - Cabo Mondego

Da aplicação do índice aos dados obtidos para o sector Aveiro - Cabo Mondego, foi apenas possível obter um conjunto de valores de  $I_v$ , visto que o período de levantamentos foi apenas de 10 meses. Os valores obtidos estão expressos na figura 7.21., podendo-se verificar que existem 3 locais com índices muito elevados (próximos de 1) que, como tal, poderão ser classificados como extremamente frágeis, isto é, predispostos à existência de galgamentos e/ou erosão. Estes três locais (PMS, PA e VS) estão dispostos a sul de esporões, sofrendo erosão dunar acelerada. Nas restantes praias os índices de vulnerabilidade são inferiores, com valores menores do que 0.5.

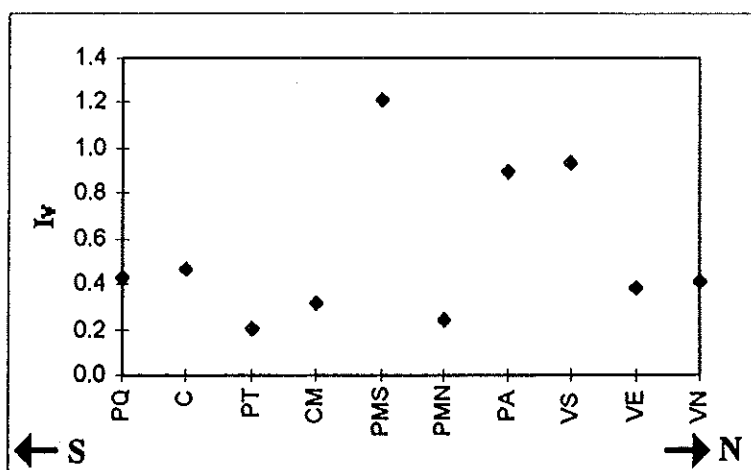


Figura 7.21. Variação longitudinal de  $I_v$  entre Praia de Quiaios (PQ) e Vagueira Norte (VN).

Na figura 7.22. projectou-se o recuo observado para o período 1980/90 (Ferreira, 1993) nos locais agora analisados, contra os valores calculados de  $I_v$ , para cada local. É observável uma forte correlação (negativa) entre os valores do índice de vulnerabilidade morfológica e a tendência evolutiva, com as praias que sofrem maiores recuos médios a possuírem valores de  $I_v$  superiores.

Os dados obtidos indicam que para  $I_v > 0.9$  as praias apresentam vulnerabilidade extremamente elevada (recuos efectivos superiores a 2 m/ano). Assim, tendo por base uma integração das aplicações efectuadas, propõem-se os seguintes limites:

- |                    |                                    |
|--------------------|------------------------------------|
| $I_v < 0.35$       | Comportamento robusto;             |
| $0.35 < I_v < 0.9$ | Comportamento frágil;              |
| $I_v > 0.9$        | Comportamento extremamente frágil. |

A separação proposta é baseada num número de dados relativamente restrito e em apenas dois tipos de costas. Apesar de estas possuírem regimes energéticos distintos, os limites apresentados deverão ser considerados provisórios, necessitando de futuras confirmações, com base na análise de um maior conjunto de dados e/ou locais. Nomeadamente, através da inclusão de dados referentes a praias com características morfodinâmicas distintas (ex.: praias dissipativas e ultradissipativas).

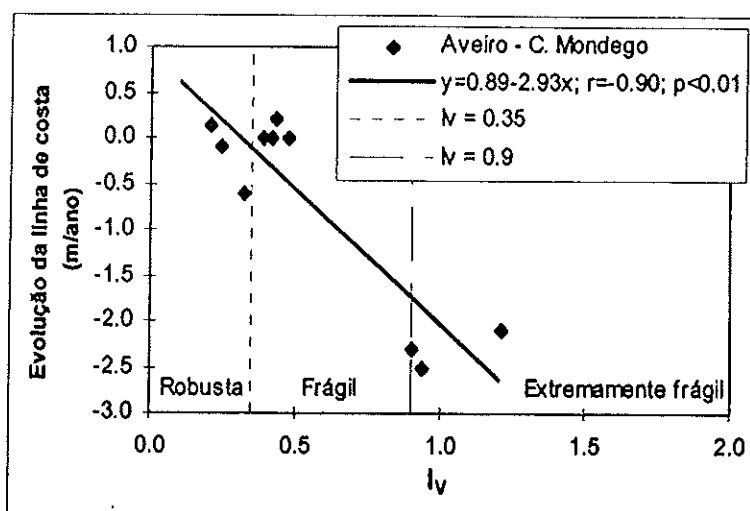


Figura 7.22. Relação entre  $I_v$  e a evolução da linha de costa em Aveiro - Cabo Mondego, com indicação da recta de ajuste (os valores negativos representam erosão).

### 7.6.3. Avaliação do índice de vulnerabilidade morfológica

O índice de vulnerabilidade morfológica apresentado tem por base a caracterização do perfil de praia à macroescala, sendo como tal aplicável a variações da ordem dos meses a sazonais. No entanto, convém aferir da qualidade deste tipo de índice, utilizando outros levantamentos e verificando se as praias com índices que denotam maior fragilidade se comportaram de acordo com o previsto. Para esta avaliação, utilizaram-se os dados dos levantamentos topográficos efectuados durante a campanha MOLICEIRO 1/95, que decorreu em Abril de 1995, em conjunto com a experiência Areão 95. Nessa campanha, foram efectuados 9 perfis topográficos da praia emersa, nos locais anteriormente estudados, nas campanhas MOLICEIRO de 1992 e 1993, existindo um desfaseamento de quase 2 anos entre a última campanha de 1993 (Junho) e a de Abril de 1995. Não foi amostrado o perfil Costinha por dificuldades de acesso ao local.

Os perfis obtidos no levantamento de 1995 foram comparados com os perfis médios obtidos para os levantamentos de 1992/93 (figura 7.23.), sendo calculada a diferença volumétrica entre cada levantamento e o perfil médio respectivo, para cada local (tabela 7.14.). O cálculo teve por base o nível médio do mar e um procedimento igual ao referido em 7.2.1.. Foi tomado como limite de não-mobilidade relativa o ponto mais interior a partir do qual não se verificaram alterações significativas no perfil, excluindo as variações na zona dunar derivadas de acumulação eólica ou de acção antrópica.

**Tabela 7.14.** Diferença volumétrica e máximo recuo da duna entre os perfis médios de Set 92/Jun 93 e os perfis de Abril de 1995, para a área de estudo.

Praia	Diferença volumétrica (m <sup>3</sup> /m)	Máximo recuo da duna (m)
PQ	+111.0	0
PT	+38.5	0
CM	-38.3	0
PMS	-105.5	-5.1
PMN	-182.6	0
PA	-141.6	-11.3
VS	-226.4	-1.6
VE	-82.3*	0*
VN	-144.1**	-4.1**

\* Realimentação artificial da duna e da alta praia

\*\* Reconstrução do paredão após forte erosão

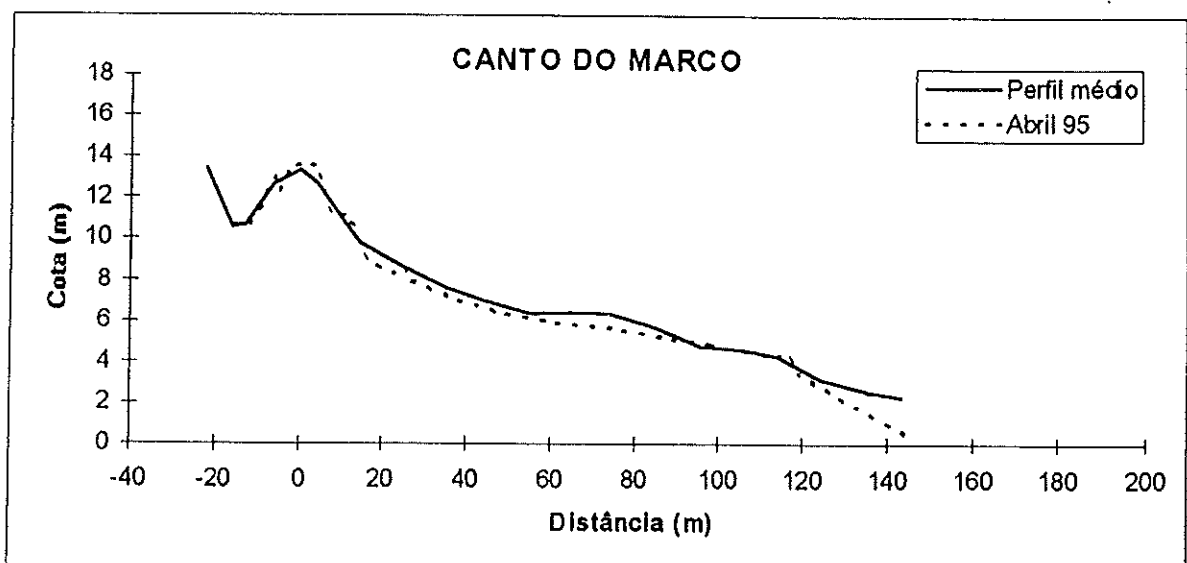
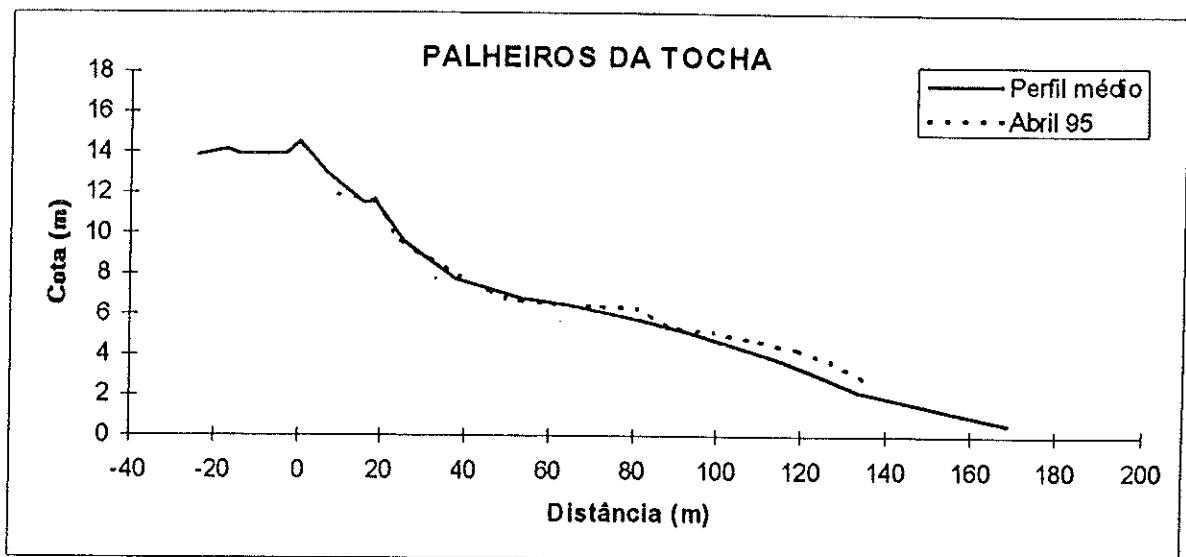
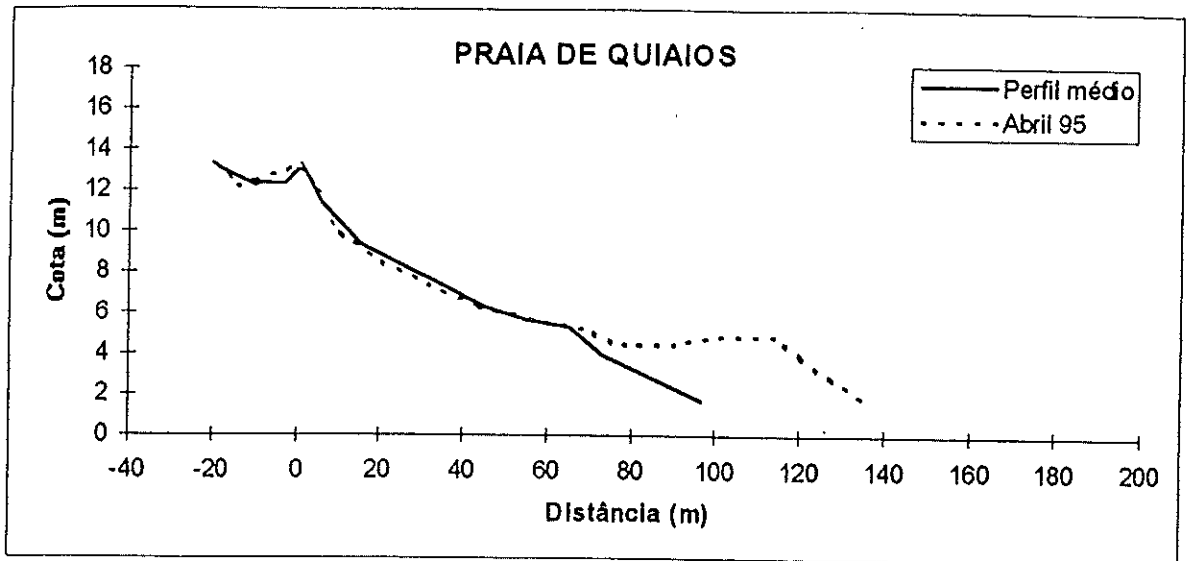


Figura 7.23. Comparação, local a local, dos perfis médios (Set 92/Jun 93) com o perfil obtido em Abril de 1995, referidos ao Zero Hidrográfico (continua).

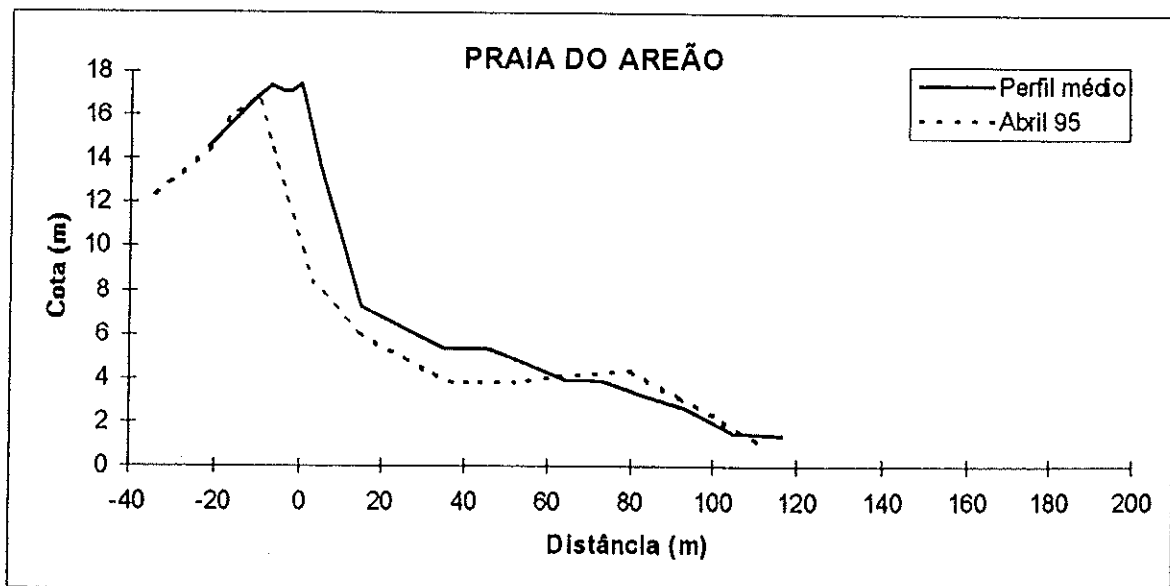
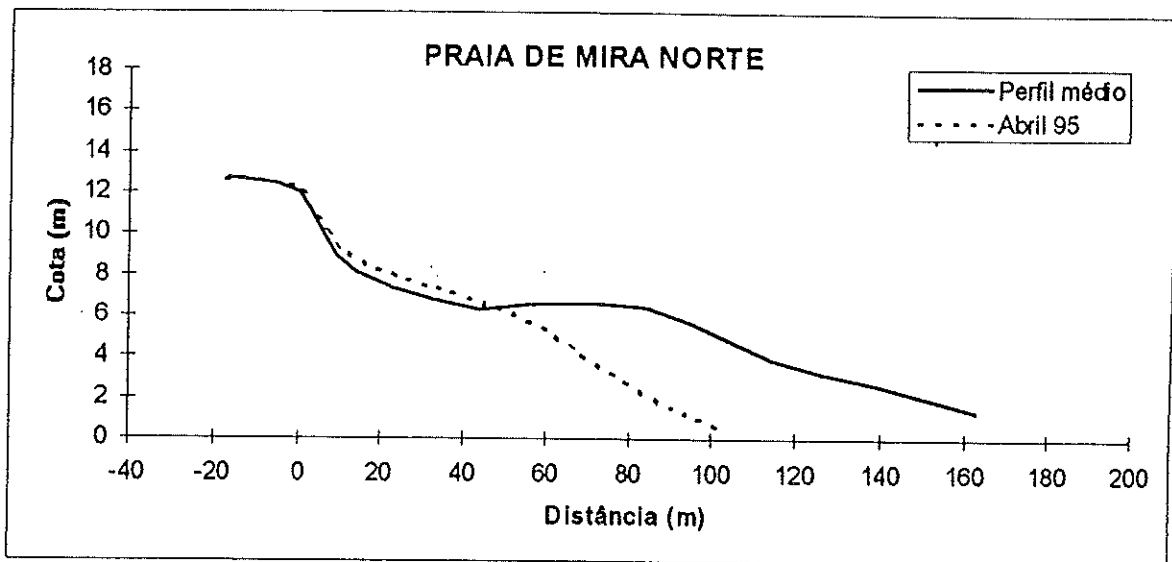
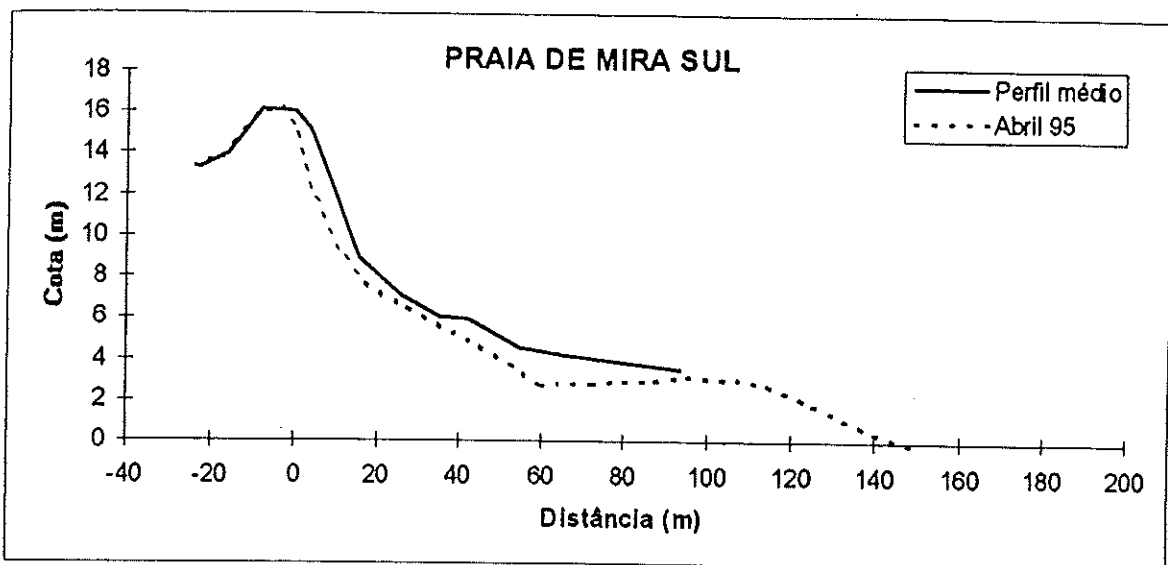


Figura 7.23. Comparação, local a local, dos perfis médios (Set 92/Jun 93) com o perfil obtido em Abril de 1995, referidos ao Zero Hidrográfico (continua).

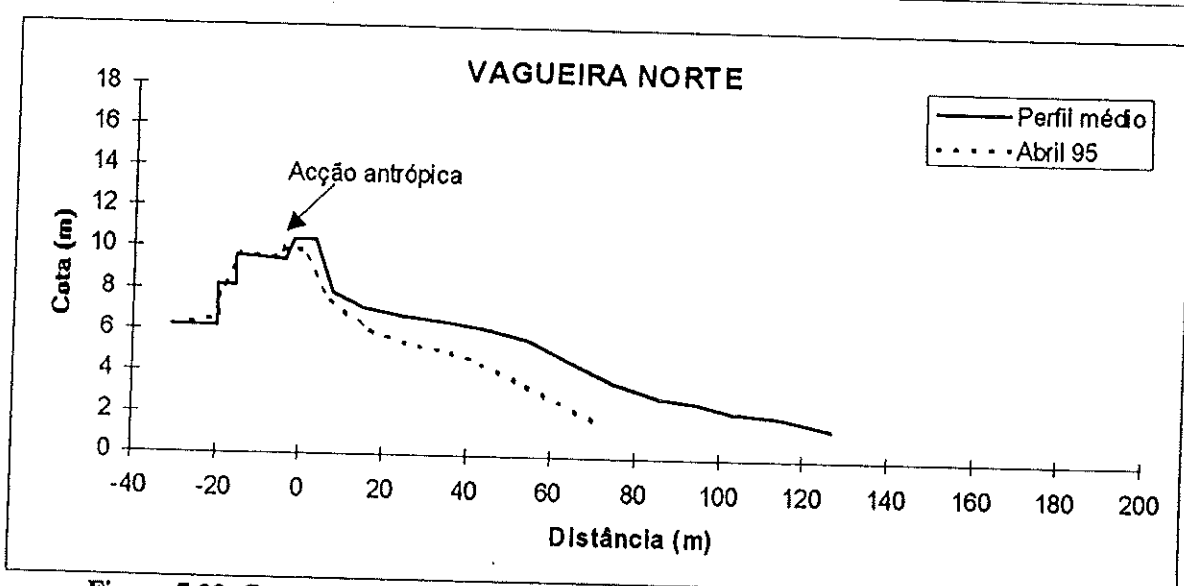
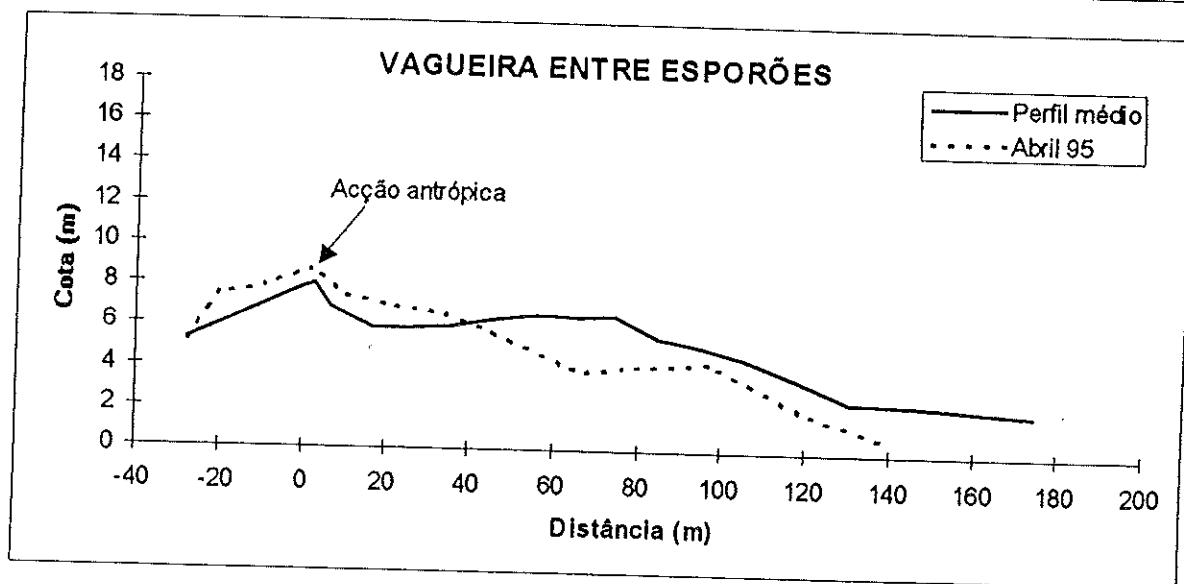
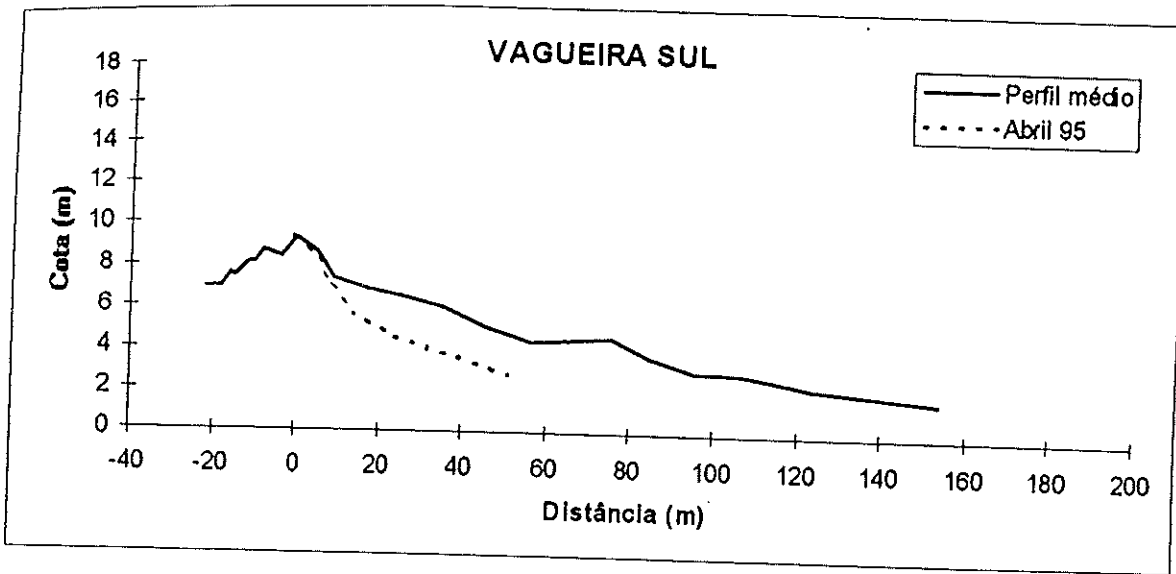


Figura 7.23. Comparação, local a local, dos perfis médios (Set 92/Jun 93) com o perfil obtido em Abril de 1995, referidos ao Zero Hidrográfico.

Entre o levantamento de Abril de 1995 e o perfil médio de cada praia nota-se uma tendência global para a existência de um menor volume sedimentar no levantamento mais recente, com excepção dos locais PQ e PT. Essa tendência poderá ser o reflexo de um comportamento global ou, apenas, resultado da ocorrência de condições de agitação com energia elevada, anteriores ao levantamento de Abril de 1995. No entanto, e independentemente da variação volumétrica registada, é importante notar quais as praias em que se observou recuo efectivo, ou seja, erosão da duna ou danificação de estruturas de protecção costeira. Tal facto ocorreu em Praia de Mira Sul, em Praia do Areão, em Vagueira Sul e em Vagueira Norte, denotando uma concordância elevada com os locais que apresentaram valores de  $I_v > 0.9$ , com excepção de Vagueira Norte, onde ocorreram intervenções antrópicas. Nos restantes casos, ainda que as variações volumétricas possam ter sido elevadas (ex.: Praia de Mira Norte, com  $-182.6 \text{ m}^3/\text{m}$ ), a duna não foi atingida, evidenciando a existência de um “stock” sedimentar suficiente para evitar a erosão dunar. Assim se comprova que a capacidade de resistência de uma praia à agitação incidente (robustez) não é unicamente indicada pelo volume sedimentar dela extraído mas pela relação entre esse volume e o volume disponível na praia (“stock” sedimentar).

De acordo com os resultados obtidos, parece satisfatória a utilização de um índice deste tipo para determinação dos locais fragilizados por carência sedimentar, permitindo prever em que praias poderá, tendencialmente, ocorrer recuo efectivo.

#### 7.6.4. O índice do momento

Como verificado, o índice  $I_v$  possui grande potencial de aplicação para a caracterização da evolução costeira de médio a longo-termo. Contudo, adaptações deste índice podem também ser utilizadas como uma ferramenta para a gestão costeira prevendo a vulnerabilidade ou robustez de uma praia num dado instante ou momento. O índice do momento ( $I_M$ ) será, então, obtido por:

$$I_M = (V_{\max} - V_{\min})/V_m \quad (7.6)$$

onde  $V_m$  é o volume da praia obtido num determinado levantamento.

Este índice permite saber se em determinado momento a praia se encontrava robusta, frágil ou extremamente frágil. Pode, igualmente, comparar-se o valor obtido com os valores prévios de  $I_M$ , para os quais se registaram galgamentos, erosão e/ou danificações, para uma área específica. Assim, é possível saber, em cada momento, se a praia se encontra próxima da ruptura ou não.

#### 7.6.4.1. Aplicação à Praia de Faro

Aplicando o índice do momento à Praia de Faro, às situações Verão de 1996 e Inverno de 1996, obtiveram-se os valores expressos na tabela 7.15..

Tabela 7.15. Valores de  $I_M$  para a Praia de Faro, para Julho 96 (V 96) e Dezembro 96 (I 96).

$I_M$	Local A	Local B	Local C	Local D	Local E	Média
I 96	0.47	1.12	0.57	0.17	0.43	0.55
V 96	0.37	0.61	0.32	0.29	0.22	0.36

Em condições de Inverno, os locais analisados na Praia de Faro apresentaram um comportamento frágil, com quase todos eles possuindo valores de  $I_M$  superiores a 0.35. Em oposição, nas condições de Verão apenas o local B apresentou um valor de  $I_M$  elevado, estando A e C no limite entre robustez e fragilidade. Desta forma, verifica-se que a aplicação do índice de momento indica claramente uma variação sazonal. Pela análise da tabela é ainda visível que os valores dos índices são genericamente superiores nos locais A a C do que para D e E, quer em condições de Inverno como de Verão. Esta variação entre locais também era esperada, visto que já tinha sido identificada em estudos anteriores (Martins *et al.*, 1996; Ferreira *et al.*, 1997).

Em Janeiro de 1998, uma tempestade com altura significativa ao largo próxima de 6 m, foi responsável por variações volumétricas importantes na área de estudo, tendo-se observado galgamentos nos locais B e C e recuo dunar no local A. Pelo contrário, os locais D e E não evidenciaram erosão dunar ou galgamento, correspondendo as variações volumétricas apenas à erosão da berma. Recorrendo aos perfis topográficos obtidos imediatamente após a tempestade de Janeiro de 1998, calcularam-se os volumes para cada local e o correspondente valor de  $I_M$ , para este evento particular (tabela 7.16.).

Tabela 7.16. Valores de  $I_M$  para a Praia de Faro, após a tempestade de Janeiro de 1998.

$I_M$	Local A	Local B	Local C	Local D	Local E	Média
Janeiro 98	0.47	0.95	0.56	0.37	0.37	0.54

Os valores expressos na tabela 7.16. estão de acordo com as condições pós-tempestade, ou seja, valores genericamente elevados, e com o comportamento esperado para cada local estudado. Assim, os locais A a C evidenciam comportamento frágil a muito frágil, enquanto os locais D e E se encontram próximos do limite entre a robustez e a fragilidade da praia. Ressalva-se que o valor obtido para o local A poderá estar subestimado, pois não se obteve nenhum registo de Verão com berma bem desenvolvida, neste local, pelo que o valor do volume máximo ( $V_{max}$ ) utilizado foi geralmente inferior ao usado para os outros locais.

#### 7.6.4.2. Aplicação ao sector Aveiro - Cabo Mondego

A aplicação do índice do momento ao sector Aveiro - Cabo Mondego deve ser interpretada de forma cuidadosa, visto que o número de levantamentos e o período de amostragem são exíguos, relativamente ao que seria recomendável para uma aplicação deste tipo (um ano de observações com intervalos máximos de 2 meses entre perfis). Apesar destas dificuldades, optou-se por comparar as situações obtidas em Fevereiro de 1993 e em Junho de 1993, considerando-as como representativas, respectivamente, de situações de Inverno e de Verão. Os resultados obtidos estão expressos na tabela 7.17..

Tabela 7.17. Valores de  $I_M$  para as praias do sector Aveiro - Cabo Mondego, para Fevereiro e Junho de 1993.

Local	Fevereiro 93	Junho 93
P. Quiaios	0.54	0.35
Costinha	0.54	0.36
P. Tocha	0.23	0.19
Canto do Marco	0.38	0.28
P. Mira Sul	1.28	0.66
P. Mira Norte	0.27	0.25
P. Areão	0.89	0.66
Vagueira Sul	1.34	0.60
Vagueira E.	0.43	0.32
Vagueira Norte	0.52	0.36
<b>Média</b>	<b>0.64</b>	<b>0.40</b>

Tal como para a Praia de Faro, também aqui é evidente a sazonalidade existente, com valores de  $I_M$  mais elevados em Fevereiro do que em Junho, existindo um maior número de praias em estado de fragilidade ou de extrema fragilidade em Fevereiro (8/9 locais) do que em Junho (3/4 locais). É igualmente observável que as praias descritas como possuindo comportamento médio extremamente frágil são as evidenciam valores mais elevados de  $I_M$ , quer no Verão, quer no Inverno, nunca deixando de serem consideradas, pelo menos, como frágeis (valor mínimo de 0.60 para Vagueira Sul, em Junho de 93).

As aplicações apresentadas para o índice do momento indicam claramente que as variações sazonais e os efeitos de tempestades na morfologia da praia podem ser descritos por modificações do seu valor. Assim, este índice poderá constituir uma ferramenta de gestão importante, nomeadamente fornecendo valores de controlo para programas de acompanhamento sistemático do estado da praia, por comparação com casos anteriores onde os valores para os quais ocorreram danos ou erosão acentuada sejam conhecidos.

## 7.7. MÁXIMA VARIAÇÃO VERTICAL

A variabilidade vertical no perfil é igualmente importante para a compreensão do comportamento morfodinâmico da praia, fornecendo uma ideia das deslocações verticais associadas a episódios de erosão ou de acreção. Na figura 7.24. estão representados todos os perfis obtidos em cada local estudado, de Aveiro ao Cabo Mondego, conjuntamente com a máxima variação vertical registada na praia emersa.

Pela análise da figura 7.24. é visível que a máxima variação vertical em todos os perfis da parte emersa da praia está associada a variações na berma, indicando a importância dos episódios de transformação barra-berma, associados a variações nas condições de agitação.

De entre os 10 locais analisados, a máxima variação vertical foi observada em Praia de Mira Sul, com um valor superior a 5.0 m, e o valor mínimo em Palheiros da Tocha, com 2.2 m, evidenciando uma diferença apreciável entre praias submetidas a condições de agitação ao largo semelhantes.

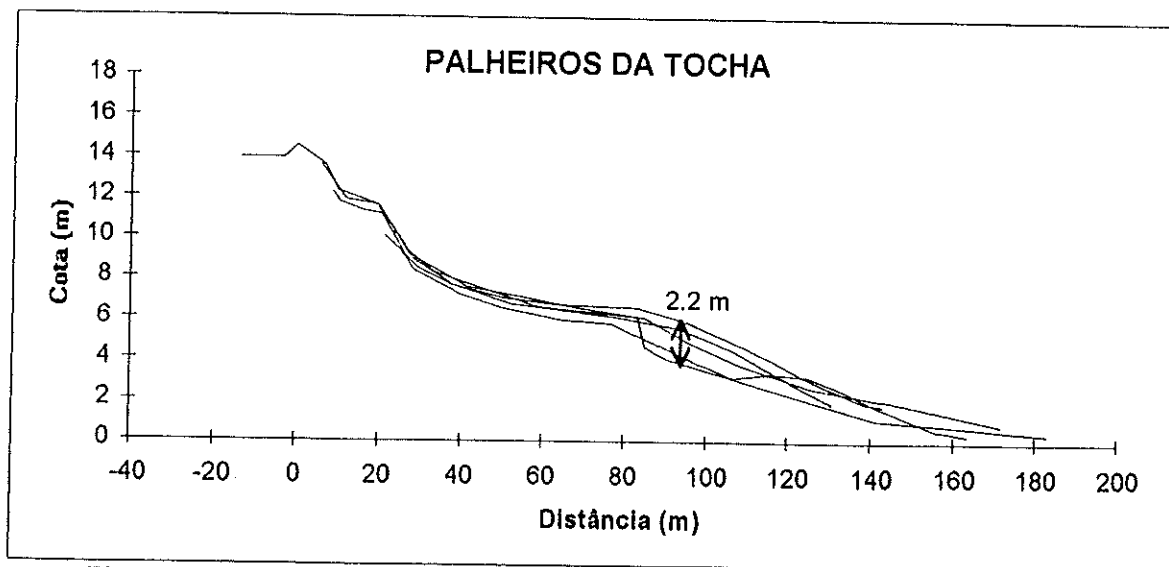
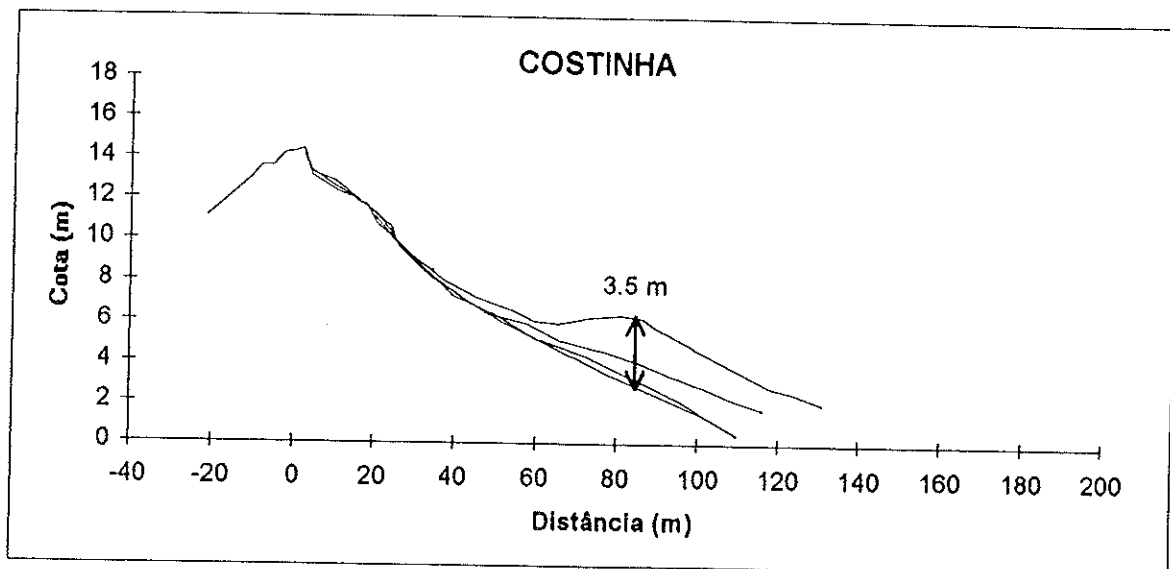
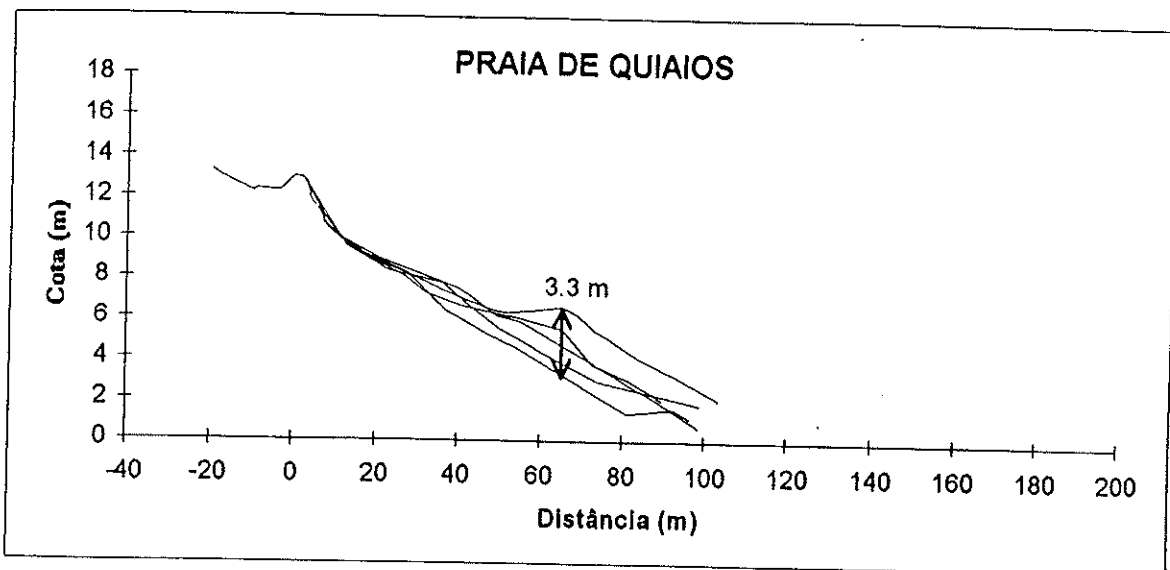


Figura 7.24. Máxima variação vertical obtida para o conjunto de levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993. Perfis referidos ao ZH (continua).

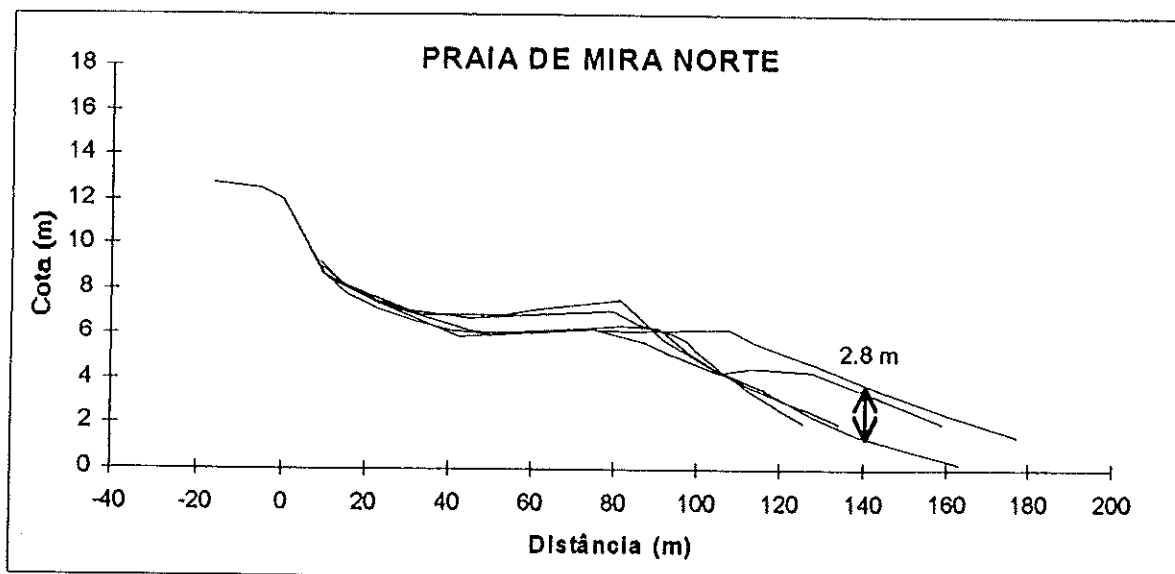
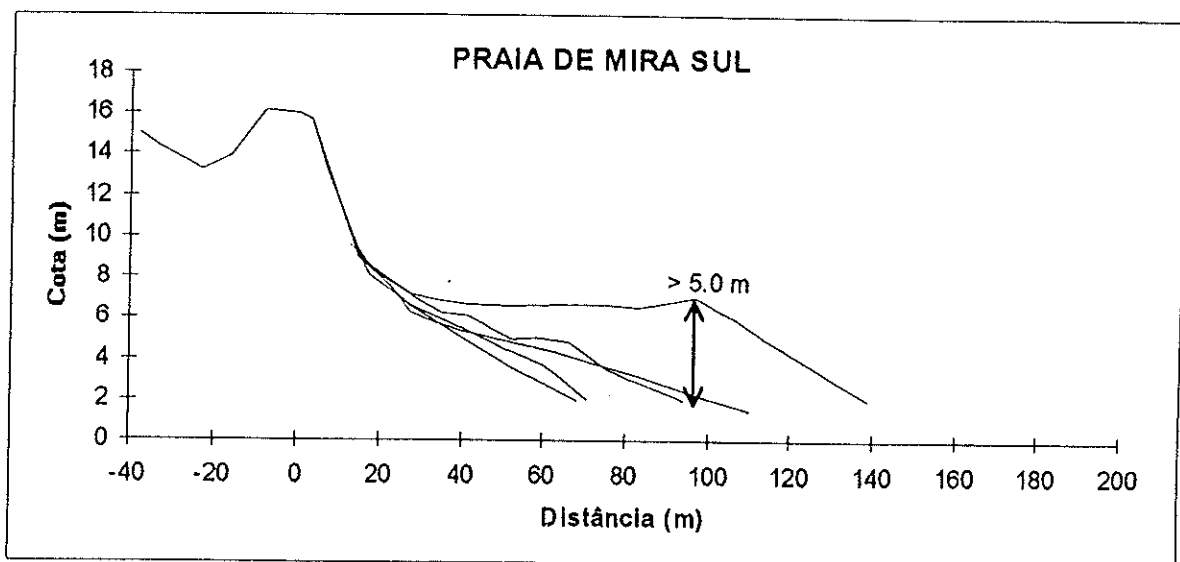
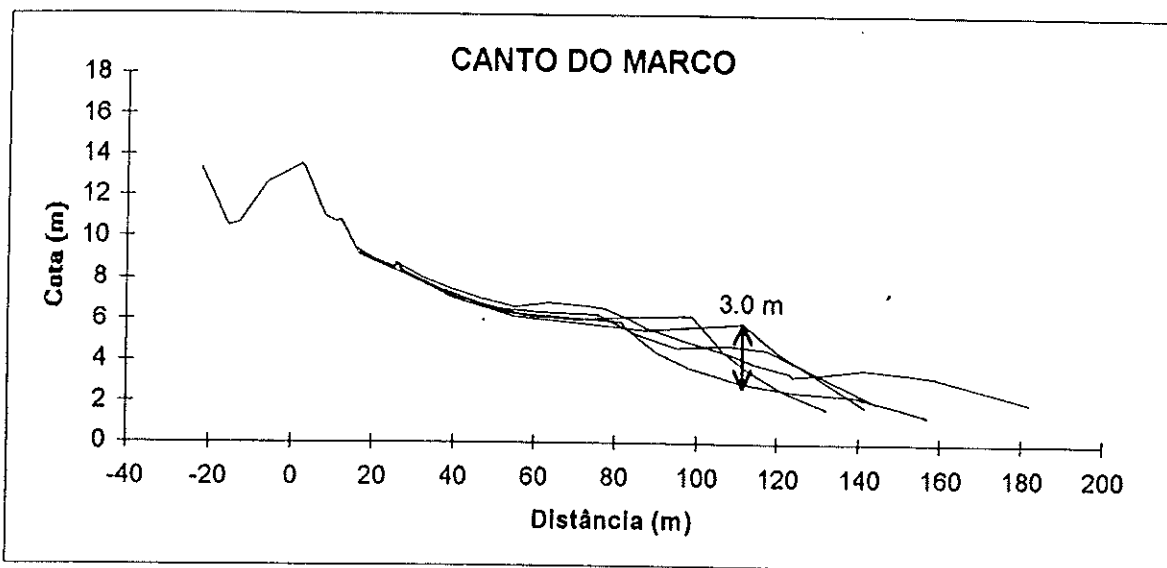


Figura 7.24. Máxima variação vertical obtida para o conjunto de levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993. Perfis referidos ao ZH (continua).

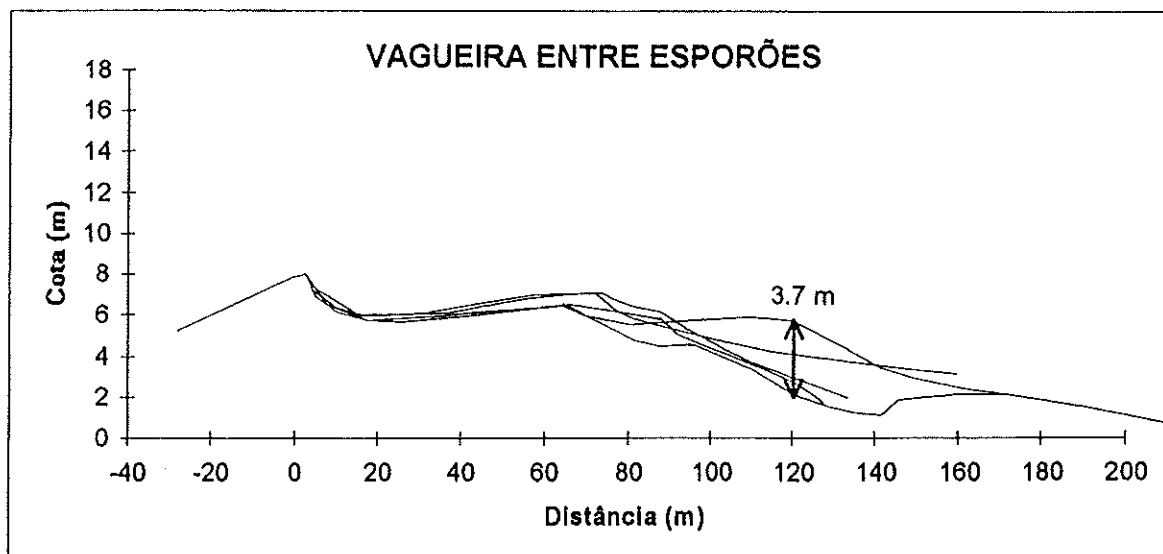
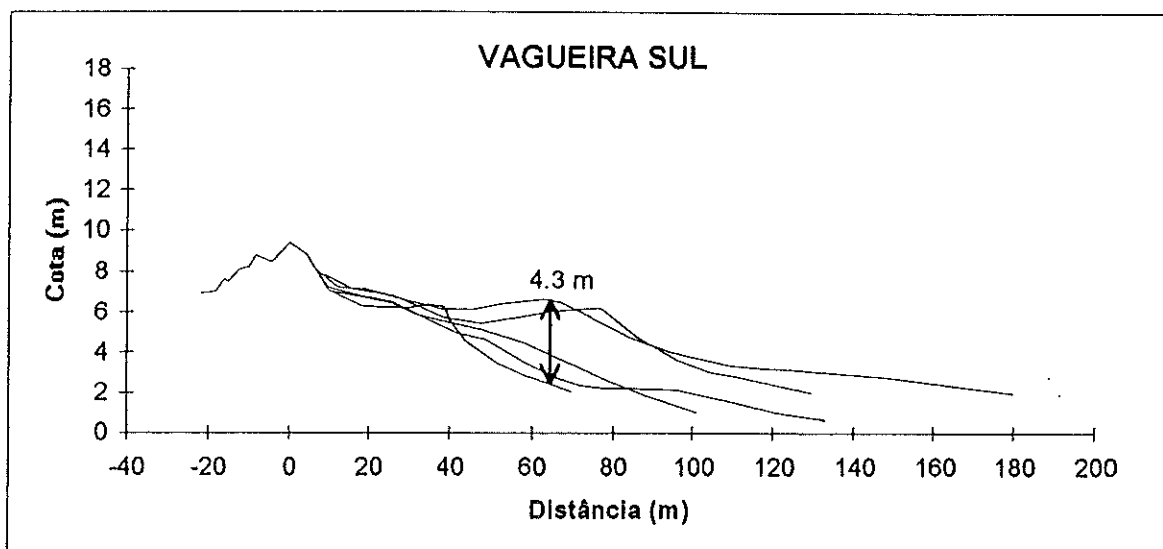
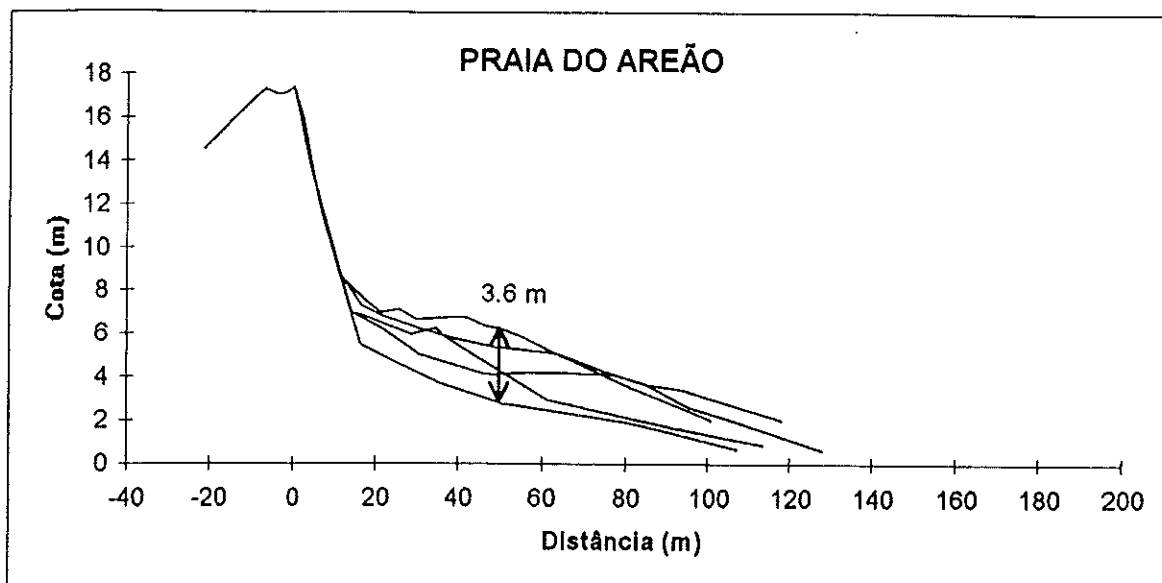


Figura 7.24. Máxima variação vertical obtida para o conjunto de levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993. Perfis referidos ao ZH (continua).

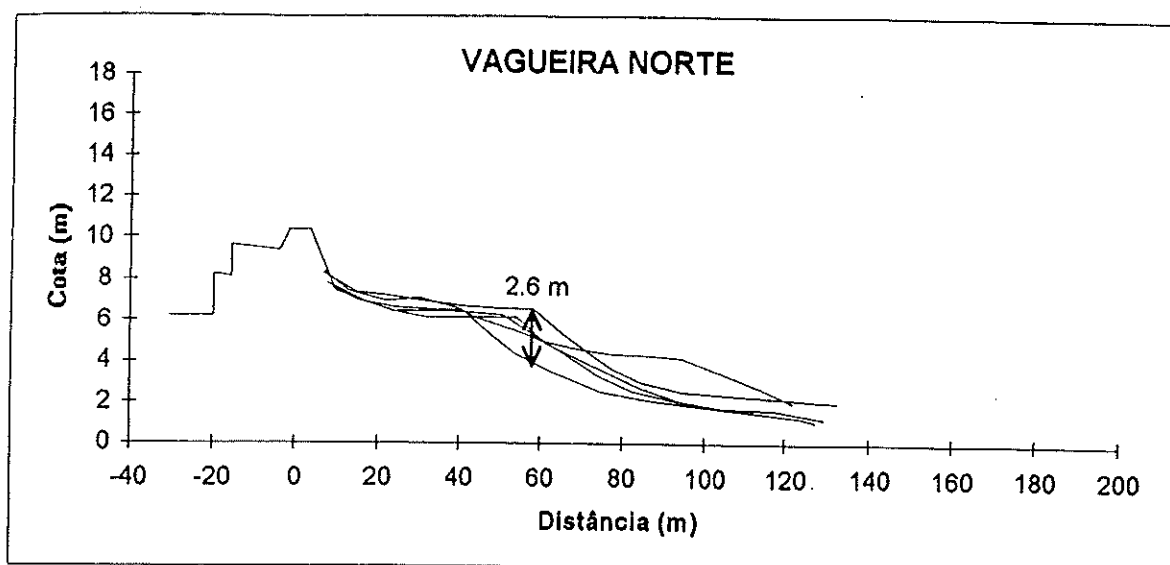


Figura 7.24. Máxima variação vertical obtida para o conjunto de levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993. Perfis referidos ao ZH.

Compararam-se os desvios obtidos com os resultantes da previsão desenvolvida por DeWall e Christensen (1984), descrita pela expressão:

$$\Delta D = 1.15H_e - 1.25 \quad (7.7)$$

que relaciona a altura da onda excedida durante 12 horas anualmente (ou excedida por 0.137% das observações,  $H_e$ ), com a máxima variação vertical ( $\Delta D$ ). Para os dados do período de análise, Setembro 92 a Junho 93, onde  $H_e = 6.96$  m, o valor de  $\Delta D$  calculado foi de 6.75 m, sendo superior ao máximo valor registado em cerca de 35%. No entanto, é necessário considerar que os levantamentos nem sempre atingiram níveis inferiores a 2 m ZH e que raramente expressam a totalidade da praia emersa, pelo que os valores máximos observados poderão estar ligeiramente subestimados. Este tipo de cálculo permite apenas determinar valores máximos esperados para uma área com iguais características de agitação, sem considerar as características morfológicas da praia. Desta forma, não é possível determinar níveis máximos individuais, em cada praia, recorrendo unicamente à expressão 7.7. Tal poderá ser conseguido através da introdução de um índice caracterizador de cada local, tal como o índice  $I_v$ , nessa equação. Determinou-se, deste modo, a relação entre  $\Delta D$  e  $I_v$  para a área em questão, que está apresentada na figura 7.25., e que pode ser expressa através da fórmula:

$$\Delta D = 2.138I_v + 2.22 \quad (7.8)$$

com um índice de correlação de  $r = 0.88$ .

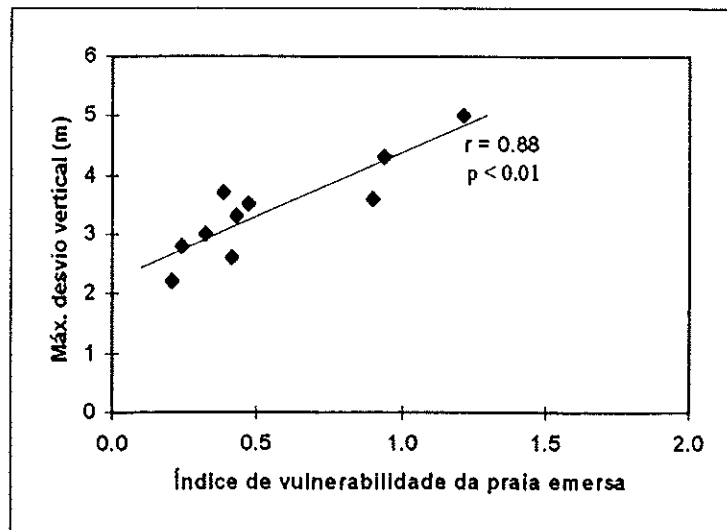


Figura 7.25. Relação entre  $\Delta D$  e  $I_v$ , para as praias analisadas.

Introduzindo no termo da direita da expressão (7.8) o valor de  $H_e$  (6.75 m), obtém-se:

$$\Delta D = 0.307(I_v H_e) + 2.22 \quad (7.9)$$

para os dados em questão, mantendo o mesmo índice de correlação. Utilizando a expressão 7.9, ou uma semelhante, na forma:

$$\Delta D = a(I_v H_e) + b \quad (7.10)$$

torna-se possível estabelecer valores máximos de variação vertical esperados em cada local para as condições de agitação, ao largo, numa escala temporal de meses a ano (sazonal) - macroescala.

## 7.8. EROSÃO *VERSUS* ACREÇÃO (TRANSIÇÃO BARRA/BERMA)

### 7.8.1. Conceitos teóricos

Ocorrem, na Natureza, dois extremos claros de perfis, que têm sido designados por vários termos, de entre os quais se destacam, pela sua maior utilização: perfil de

barra/perfil de berma; perfil de Verão/perfil de Inverno; perfil de tempestade/perfil de calmaria; e perfil de erosão/perfil de acreção. Qualquer um dos conjuntos de expressões referidas pretende representar a transição barra-berma associada a condições erosão-acreção e a trocas sedimentares transversais.

A determinação de critérios e limites para distinguir a resposta de um perfil de praia relativamente às condições de agitação incidente tem sido objecto de estudo de vários autores, desde o final dos anos 30 até à actualidade. Os primeiros critérios utilizados para determinar limites de erosão *versus* acreção usavam a declividade da onda ao largo (Waters, 1939 *in* Larson e Kraus, 1989; Johnson, 1949, 1952) ou uma relação entre este parâmetro e a razão entre a média granulométrica e o comprimento de onda ao largo (Rector, 1954). Estes critérios iniciais eram unicamente baseados em ensaios laboratoriais de pequena escala, com ondas monocromáticas de pequeno porte, não sendo representativos de condições reais.

Posteriormente, após estudos comparativos efectuados em laboratório e no campo, verificou-se a inadequação dos limites determinados em experiências laboratoriais relativamente às condições reais (Seymour e Castel, 1988; Larson e Kraus, 1989; Sunamura, 1989), registando-se inclusive diferenças de uma ordem de grandeza nos limites observados (Sunamura, 1989).

O ajuste relativamente fraco dos modelos baseados em testes laboratoriais com ondas monocromáticas aos dados reais, para a previsão de transporte transversal à praia, implica que as relações empíricas estabelecidas no laboratório não deveriam constituir ferramentas de previsão para variações reais dos perfis de praia (Seymour e Castel, 1988). Por esta razão, optou-se por se considerar unicamente os resultados obtidos em experiências de grande escala (em praias ou em tanques de ondas de grande escala) como sendo possivelmente aplicáveis à área de estudo, pelo que a sùmula teórica apresentada em seguida apenas englobará trabalhos efectuados nestas condições.

Dean (1973) desenvolveu um critério de previsão de perfis barra/berma ou de condições de erosão/acreção, expresso pela relação:

$$H_{so}/L_o = K(\pi w_s/gT) \quad (7.11)$$

onde  $H_{so}$  e  $L_o$  representam, respectivamente, a altura significativa e o comprimento de onda ao largo,  $g$  é a aceleração gravítica,  $T$  é o período da onda e  $w_s$  a velocidade de queda das partículas. O autor determinou um valor crítico de  $K = 1.7$  para as experiências laboratoriais de pequena escala, originando-se perfis de berma para valores inferiores a 1.7 e de barra para valores superiores. Em estudos posteriores (Kriebel *et al.*, 1986) verificou-se que este valor limite deverá ser consideravelmente superior para praias naturais ( $4 < K < 5$ ).

Larson e Kraus (1989), aplicando o mesmo critério a dados de tanques de ondas de larga-escala, determinaram um valor crítico de  $K = 5.5$ . Estes autores referiram ainda a possibilidade de obtenção de uma melhor delimitação entre perfis de barra e perfis de berma caso o critério utilizado considerasse o parâmetro proposto por Dean ( $\pi w_s/gT$ ) elevado a um expoente, obtendo-se:

$$H_{so}/L_o = K'(\pi w_s/gT)^{1.5} \quad (7.12)$$

com geração de um perfil de berma para  $K' < 115$  e de um perfil de barra para valores de  $K' > 115$ .

Larson e Kraus (1989) testaram, ainda, outros critérios, nomeadamente a relação proposta por Larson *et al.* (1988), descrita pela equação:

$$H_{so}/L_o = M(H_{so}/w_s T)^3 \quad (7.13)$$

com  $M < 0.0007$  correspondendo a perfil de barra e  $M > 0.0007$  a perfil de berma. Esta relação foi determinada para condições laboratoriais com ondas regulares, mas os autores referem que o valor crítico  $M = 0.0007$  poderá ser igualmente usado para separar condições de erosão/acreção no campo, quando utilizada a altura média ao largo ( $\bar{H}_o$ ), considerando  $\bar{H}_o = 0.626H_{so}$ , de acordo com a distribuição de Rayleigh. Larson e Kraus (1989) apontam a existência de critérios mais simples, com resultados satisfatórios para situações de campo, onde apenas um dos parâmetros é usado como critério. Tal é o caso de:

$$\bar{H}_o/w_s T = c \quad (7.14)$$

com

$c < 2$  formação de perfil de berma,

$c > 2$  formação de perfil de barra,

o que é relativamente concordante com os valores propostos por Wright e Short (1984) e por Masselink (1994) para a separação entre perfis reflectivos e intermédios.

Caso se utilize  $H_{so}$ , em vez de  $\bar{H}_o$ , o valor limite de  $c$  passa a ser de  $c = 3.2$ .

Este critério (7.14) é virtualmente igual ao critério inicialmente proposto por Dean (7.11), se considerarmos que as ondas ao largo se comportam de acordo com a teoria linear. Assim sendo, e substituindo  $L_o$  por  $(gT^2/2\pi)$  em 7.11 obtém-se:

$$(H_{so}/w_sT) = K/2 = c \quad (7.15)$$

e se considerarmos  $\bar{H}_o = 0.626H_{so}$ , verifica-se que  $c$  e  $K$  estão relacionados pela expressão:

$$c = K/3.2 = (\bar{H}_o/w_sT) \quad (7.16)$$

pelo que os valores propostos por Larson e Kraus (1989) deveriam ser  $c = 1.72$  para um valor de  $K = 5.5$  ou, então,  $K = 6.4$  para um valor de  $c = 2$ .

A possibilidade de aplicação, com algum rigor, de critérios simples (ex.:  $H/w_sT$ , Wright e Short, 1984; Larson e Kraus, 1989, 1992; Dalrymple, 1992; Silvester e Hsu, 1997; ou  $H_o/D_{50}$ , Larson e Kraus, 1989, 1992), permite uma mais fácil utilização dos mesmos e, em alguns casos, eliminar uma sobreposição de parâmetros semelhantes, visto que a declividade ( $H/L$ ) se encontra de certa forma englobada em  $H/w_sT$ , dada a dependência do comprimento de onda relativamente ao período.

Dalrymple (1992) ensaiou o desenvolvimento de um outro parâmetro simples, denominado de parâmetro do perfil ( $P$ ), tendo por base a relação 7.12, com  $K' = 115$ , de Larson e Kraus (1989), obtendo:

$$P = (g\bar{H}_o^2)/(w_s^3T) \quad (7.17)$$

com

$P > 10400$  formação de perfil de barra ou erosão,

$P < 10400$  formação de perfil de berma ou acreção.

O autor refere que o valor crítico varia entre 9000 e 10400, dependendo das aproximações empíricas utilizadas no seu cálculo. Jiménez *et al.* (1993) consideram que o método de Dalrymple permite obter um bom discriminador entre erosão ou acreção num dado perfil mas tem a desvantagem de não ser directamente dependente da variação volumétrica ocorrida. Kraus e Mason (1993) referem que a utilização de  $P$  é adequada para a distinção entre tipos de perfis e que deverá produzir melhor resultado do que a utilização de um único parâmetro como, por exemplo,  $\bar{H}_o/w_sT$ . No entanto, o valor limite estimado por estes autores foi de  $P_s = 22900$ , utilizando  $H_{so}$  e  $T_p$  na equação 7.17, contra o valor de  $P_s = 26500$ , correspondente a  $P = 10400$ .

Recentemente, Sunamura e Takeda (1993) utilizaram um critério que conjuga parâmetros de interacção onda-sedimento e onda-topografia com a declividade da onda ao largo, obtendo a relação:

$$(H_{so}\tan\beta)/(w_sT) = A(w_s/g^{0.5}H_{so}^{0.5}) \quad (7.18)$$

onde  $\tan\beta$  é o declive da face da praia. Este critério foi aplicado à migração conjunta de barras e da linha de costa, para dados de praias microtidais japonesas, americanas e australianas, tendo-se concluído que para valores de  $A > 17$  ocorre migração das barras para o largo e recuo da linha de costa, enquanto que o oposto se passa para valores de  $A < 17$ . Os autores consideram o limite  $A = 3.5$ , obtido através de dados laboratoriais, como correspondente ao valor abaixo do qual não ocorre movimentação significativa das barras nem da linha de costa, em qualquer direcção.

Todas as aproximações anteriores dizem respeito a condições de agitação ao largo, não se utilizando condições na rebentação. Sunamura (1989), tendo por base os dados de Takeda e Sunamura, testa a utilização de um critério (já aplicado à migração de barras submarinas por Sunamura e Takeda, 1984) a condições de agitação na rebentação, expresso pela relação:

$$(\bar{H}_b/gT^2) = N(M_z/\bar{H}_b) \quad (7.19)$$

onde  $M_z$  é o diâmetro médio do sedimento e  $\bar{H}_b$  a altura média na rebentação. Os valores críticos encontrados pelo autor, para dados de campo em praias microtidais, são os seguintes:

- $N > 10$  formação de perfil de barra,
- $10 < N < 3.5$  formação de perfil de berma,
- $N < 3.5$  inexistência de variações significativas.

Estes valores não concordam com os obtidos pelo mesmo autor, com os mesmos parâmetros, em testes laboratoriais, e são baseados num número relativamente escasso de dados, considerados como insuficientes por Sunamura (1989).

Silvester e Hsu (1997) referem que a utilização de dois parâmetros ( $H_{so}/w_s T$  versus  $H_{so}/L_o$  ou  $M_z/H_b$  versus  $H_b/gT^2$ ) produz uma fronteira oblíqua, o que a torna difícil de aplicar. Os autores preferiram utilizar o parâmetro  $H_b/w_s T$  contra  $\xi_o$ ,  $\xi_b$ ,  $H_o/L_o$  e  $H_b/w_s T$ , obtendo como limite uma linha horizontal correspondente a  $H_b/w_s T = 4.1$ . Esta aproximação é semelhante à de Larson e Kraus (1989), utilizando a altura na rebentação e não ao largo, possuindo  $c$  o valor crítico 4.1, em vez de 2 ou de 3.2.

Para além dos vários parâmetros utilizados pelos diferentes autores e das distintas conclusões obtidas, há ainda a referir que o tipo de experiências utilizado foi muito diversificado notando-se, contudo, a existência de um número de dados de campo relativamente reduzido, em comparação com estudos laboratoriais de grande escala. Aliás, vários são os autores a considerar, durante os seus estudos, a necessidade de um mais vasto conjunto de dados de campo, por forma a melhor determinar os valores críticos para a separação entre tipos de perfil ou condições de erosão versus acreção (ex.: Larson e Kraus, 1989; Sunamura, 1989).

### 7.8.2. Aplicação à área de estudo

A determinação dos limites e dos parâmetros apresentados foi genericamente obtida para condições de mesoescala (variações de horas a dias) e, raramente, para macroescala. Neste sub-capítulo serão utilizados os critérios apresentados no ponto

anterior, verificando em que medida os limites propostos pelos diversos autores se aplicam, ou não, a situações de transição barra/berma em macroescala, para a área de estudo. Para tal, recorreu-se às diferenças volumétricas expressas na tabela 7.10., de acordo com as quais apenas se verificou uma situação de erosão da praia emersa e três de acreção, e às condições de agitação entre levantamentos, descritas na tabela 7.3.. Na figura 7.26. apresenta-se a relação entre a altura significativa da onda ao largo e a diferença volumétrica entre cada levantamento, utilizando os dados das tabelas referidas. Usaram-se, nesta figura, dois conjuntos de dados. Um deles (a negro) diz respeito às variações volumétricas médias entre levantamentos, utilizando todas as praias analisadas. O outro (a branco) utiliza apenas as praias que foram consideradas como possuindo comportamento semelhante (PQ, PT, CM, PMN, VN e VS). As rectas de regressão sobrepostas, apesar do reduzido número de observações existentes, denotam uma clara e esperada tendência para o aumento de erosão com o aumento do valor médio da altura de onda significativa ( $\bar{H}_{so}$ ). A dispersão de dados observada deve-se, em grande parte, à situação de acreção verificada entre Setembro de 1992 e Dezembro de 1992, para condições de agitação elevada, que pode ser explicada pela existência de um perfil de erosão no levantamento inicial, tendo existido alguma recuperação no cômputo geral.

Admitindo que as rectas determinadas são representativas das condições de erosão/acreção (variação perfil de barra/perfil de berma) para a área de estudo, relativamente a comportamentos de macroescala, o valor crítico de  $\bar{H}_{so}$  acima do qual ocorrerá erosão situar-se-à entre 2.34 m (Grupo de Igual Comportamento) e 2.40 m (Grupo Total).

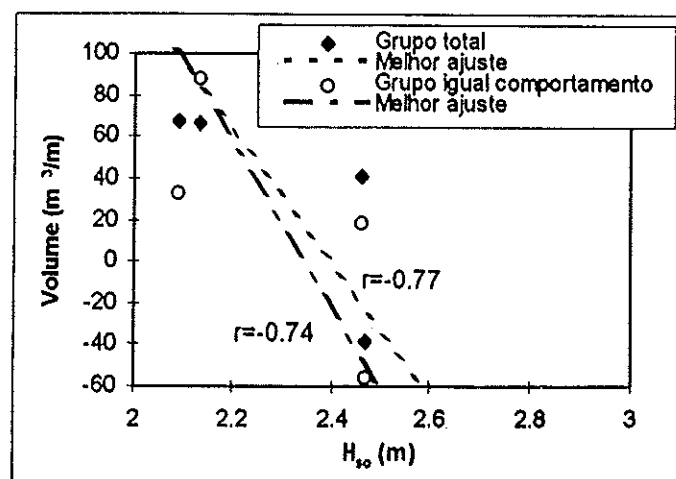


Figura 7.26. Relação entre  $\bar{H}_{so}$  e a variação volumétrica para levantamentos consecutivos referentes ao conjunto de dados obtidos na área de estudo.

Utilizando os valores críticos de  $H_{so}$  aludidos, e valores de  $T = 11.3$  s (período de pico médio anual),  $w_s = 0.07$  m/s (relativo a um diâmetro médio da face da praia de 0.5 mm) e  $\tan\beta = 0.09$  (valor médio determinado), calcularam-se os vários valores críticos esperados, para cada critério apresentado anteriormente. Para o critério de Sunamura (1989), que utiliza  $\bar{H}_b$ , calculou-se o valor de  $\bar{H}_b$  crítico considerando que  $\bar{H}_o = 0.626H_{so}$  e recorrendo às formulações de Munk (1949) e de Komar e Gaughan (1972) para transformação da altura da onda ao largo para a rebentação. Obtiveram-se valores de  $\bar{H}_b$  de 2.2 m e 2.3 m, tendo-se usado estes valores. Na tabela 7.18. apresentam-se os vários critérios utilizados, os valores limite dos coeficientes empíricos determinados para a área em estudo, os valores esperados de acordo com cada autor e a variação percentual entre valores calculados e observados.

Tabela 7.18. Resultados da aplicação dos critérios para separação entre a formação de perfil de barra ou perfil de berma e comparação entre os limites teóricos e os limites obtidos para a área de estudo.

Critério	Coeficiente empírico		Variação (%)
	Área de estudo	Teórico	
A) $H_{so}/L_o = K(\pi w_s/gT)$	K = 5.9 - 6.1	K = 5.5 (Larson e Kraus)	7 - 11
B) $H_{so}/L_o = K'(\pi w_s/gT)^{1.5}$	K' = 133 - 136	K' = 115 (Larson e Kraus)	16 - 18
C) $H_{so}/L_o = M(H_{so}/w_s T)^3$	M = 0.0011 - 0.00115	M = 0.0007 (Larson e Kraus)	57 - 64
D) $\bar{H}_o/w_s T = c$	c = 1.86 - 1.90	c = 2 (Larson e Kraus)	5 - 7
E) $P_s = (gH_{so}^2)/(w_s^3 T)$	P <sub>s</sub> = 13850 - 14560	P <sub>s</sub> = 22900 (Mason)	40 - 64
F) $(H_{so} \tan\beta)/(w_s T) =$ $A(w_s/g^{0.5} H_{so}^{0.5})$	A = 18.4 - 18.9	A = 17 (Sunamura e Takeda)	8 - 11
G) $(\bar{H}_b/gT^2) = N(M_s/\bar{H}_b)$	N = 7.7 - 8.4	N = 10 (Sunamura)	16 - 23

Pela análise da tabela 7.18. é observável que os critérios A, D e F são os que apresentam melhores resultados relativamente à área em questão, para definição de condições de transição barra/berma em situações de macroescala. Aliás, como atrás foi demonstrado, os critérios A e D são idênticos se considerarmos que  $L_o = (gT^2/2\pi)$  (teoria linear), pelo que não é de estranhar que os seus resultados sejam muito próximos. A única dúvida que permanece é relativa aos valores de K ou c a utilizar, visto que os valores propostos por Larson e Kraus (1989) não são absolutamente

concordantes. Como referido, a um valor de  $K = 5.5$  deveria corresponder  $c = 1.72$ , de acordo com a relação 7.16 e não  $c = 2$  como proposto pelos autores, enquanto que a um valor  $c = 2$  deveria corresponder  $K = 6.4$ .

Para a área em questão, e de acordo com os dados obtidos, recomenda-se a utilização dos valores críticos  $K \approx 6.0$  (utilizando  $H_{so}$ ),  $c \approx 1.9$  (utilizando  $\bar{H}_o$ ) e  $A \approx 18.5$ , respectivamente para os critérios A, D e F.

Os restantes métodos apresentados parecem possuir maior desvio relativamente aos valores críticos determinados pelo que a sua utilização poderá não ser tão efectiva, ainda que seja possível, desde que os valores limite dos coeficientes empíricos sejam alterados por forma a se aproximarem dos obtidos para o sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego. Refere-se, no entanto, que a obtenção de valores críticos mais fidedignos, para a área de estudo, em qualquer dos critérios, dependerá da aquisição futura de um conjunto de dados de base mais relevante, visto que o número de pontos envolvidos no cálculo de  $\bar{H}_{so}$  crítico não permite que o resultado obtido possua elevada fiabilidade.

## 7.9. SÍNTESE

### 7.9.1. Caracterização morfodinâmica

A aplicação, à área de estudo, dos parâmetros morfodinâmicos mais utilizados ("surf scalling", "surf similarity" e índice de Dean), permitiu obter uma caracterização geral das praias do sector Aveiro - Cabo Mondego no que respeita aos tipos de rebentação dominante e de comportamento associado. Na aplicação dos parâmetros optou-se pela separação da praia em três zonas: face da barra externa, face da barra interna e face da praia, tendo cada zona características próprias de pendor e granulometria. Desta forma, tornou-se possível determinar comportamentos parcelares, em vez de um único para toda a praia, aproximando-se as estimativas de comportamento da realidade factual.

Concluiu-se que, para as condições de agitação incidente utilizadas, a face da barra externa se comporta genericamente de forma dissipativa, sendo a rebentação dominante do tipo progressivo. À face da barra interna corresponde uma zona de

transição, sendo o seu comportamento dissipativo a intermédio e a rebentação genericamente progressiva mas tendente a mergulhante com a diminuição da altura da onda. A face da praia corresponde a um ambiente morfodinâmico intermédio a reflectivo, onde domina a rebentação do tipo mergulhante ou tubular.

Ensaiou-se uma integração morfodinâmica, para várias situações morfológicas e de agitação, que veio corroborar as conclusões atrás referidas, verificando-se que na ausência de barra interna deverá ser a própria face da praia a constituir ambiente de transição.

Os comportamentos determinados são concordantes com o observado no campo, sendo o carácter dissipativo ou dissipativo/intermédio das barras fundamental para a protecção da praia emersa adjacente, visto que estas actuam como zonas de amortecimento da energia da onda. A alteração na volumetria das barras (por retirada de material, escassez de sedimento, remoção natural, etc.) poderá alterar a totalidade do comportamento morfodinâmico da praia, levando a situações de instabilidade, nomeadamente da praia emersa.

#### 7.9.2. Variabilidade morfológica e volumétrica da praia emersa

A comparação dos volumes calculados nas 10 praias analisadas, para os levantamentos efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993, permite verificar a existência de elevadas diferenças volumétricas entre praias próximas. O volume máximo mais elevado (Praia de Mira Norte) foi cerca de 2 vezes superior ao menor volume máximo (Praia do Areão), enquanto que no que diz respeito ao volume mínimo a diferença entre estas duas praias foi de 4.5 vezes. As praias com menor volume mínimo situam-se todas a sul de esporões e denotam franco recuo (Vagueira Sul, Praia do Areão e Praia de Mira Sul). As praias com maior volume sedimentar encontram-se em locais a norte de esporões ou em locais sem recuo ou acreção apreciável.

Os cálculos volumétricos foram estendidos à capacidade sedimentar das bermas, verificando-se que os locais com menor volume médio ou onde se atingiram valores próximos de zero (inexistência de berma), coincidem com os locais com menor volume da praia emersa. Desta forma, será de esperar que, para iguais condições de agitação, sejam estas as praias onde a acção marinha deverá induzir efeitos mais nefastos (erosão dunar ou danificação de estruturas), por erosão da berma e

consequente perda de defesas próprias da praia emersa.

A análise comparada das variações volumétricas registadas e da sua variabilidade entre locais analisados, permitiu distinguir um grupo de praias com comportamento semelhante, composto por praias não afectadas directamente por estruturas costeiras (Praia de Quiaios, Palheiros da Tocha e Canto do Marco) e por praias localizadas a norte de esporões (Praia de Mira N e Vagueira N), ao qual se junta uma excepção (Vagueira S, a sul do esporão da Vagueira). A análise dos dados de campo permite referir que os grupos separados por este método se encontram relativamente de acordo com o comportamento verificado. A detecção, no futuro, de afastamento sistemático no comportamento de um local face ao padrão geral observado poderá indicar, por exemplo, ocorrência de lacunas sedimentares, entrada em erosão, influência de estruturas de protecção costeira, etc.. Assim, a aplicação contínua deste tipo de aproximação a dados de monitorização permite avaliar a evolução do comportamento de cada local e detectar eventuais alterações relativamente ao seu passado recente.

### 7.9.3. Índices de vulnerabilidade morfológica

Introduziu-se, nesta dissertação, o conceito de índice de vulnerabilidade morfológica, pretendendo relacionar a variabilidade morfológica anual de uma praia com o seu comportamento a médio prazo. O índice  $I_v$ , expresso pela equação 7.5, foi testado em 15 locais de dois sectores da costa portuguesa (Praia de Faro e Aveiro - Cabo Mondego), verificando-se que a distribuição de valores obtidos concordava, de forma genérica, com o comportamento morfológico e com a tendência de erosão/acreção de cada local. Registou-se, ainda, para os dados do sector Aveiro - Cabo Mondego, uma forte correlação entre as taxas de evolução da linha de costa e os valores do índice, correspondendo os valores mais elevados de  $I_v$  às praias com registos de erosão mais acelerada, na última década.

Face aos valores obtidos, determinaram-se limites de fragilidade *versus* robustez, sendo que para valores de  $I_v < 0.35$  a praia é considerada robusta. Se  $0.35 < I_v < 0.9$  a praia é classificada como frágil e quando  $I_v > 0.9$  a praia é considerada extremamente frágil.

Tendo por base um levantamento de Abril de 1995, para as praias do sector Aveiro - Cabo Mondego, comparou-se o perfil médio de cada local com o perfil de 1995, registando-se diferenças volumétricas muito elevadas, de local para local. Contudo, foi possível verificar que os únicos locais com recuo dunar efectivo, sem que tenha ocorrido intervenção antrópica directa, coincidiram com aqueles para os quais o índice denotou valores superiores. Desta forma, este tipo de índice parece possuir elevado potencial no que se refere à sua aplicação à gestão costeira, nomeadamente para diferenciação de áreas robustas ou estáveis de outras fragilizadas ou em franco recuo, de forma quantificada. A aplicação deste índice pressupõe a existência de planos de monitorização, que tardam a ser implantados de forma generalizada, no nosso país.

Uma adaptação possível deste índice foi denominada de "índice do momento" ( $I_M$ ), traduzindo a possibilidade de aplicação de um índice de vulnerabilidade a uma condição ou momento particular. Este índice foi aplicado aos dados da Praia de Faro e aos do sector Aveiro - Cabo Mondego, obtendo-se bons resultados na determinação de variações sazonais e na observação do comportamento dos vários locais após o efeito de uma tempestade. Assim, será possível testar o comportamento das praias monitorizadas após cada levantamento ou ao longo do tempo, sabendo se a tendência é de fragilização ou de robustecimento. Nomeadamente, será possível saber quando é que cada local entrou em fase de fragilização elevada, denotando necessidade de intervenção no sistema, caso existam bens materiais e humanos em risco. Em caso de ocorrência de temporais, a avaliação desta situação obrigará à existência de levantamentos imediatamente após a actuação desses eventos erosivos.

#### 7.9.4. Máxima variação vertical

Determinou-se, para cada local estudado, a máxima variação vertical registada entre perfis, sendo visível uma acentuada variação de valores de local para local (2.2 m a 5.0 m), para iguais condições de agitação ao largo. Desta forma, a previsão de DeWall e Christensen (1984) apenas pode fornecer valores máximos genéricos para a totalidade da área, que se verificou serem excessivamente elevados relativamente aos observados. A introdução do índice de vulnerabilidade morfológica na equação permitiu obter uma relação onde o máximo desvio vertical em dado período, à macroescala, se relaciona não apenas com o regime de agitação mas também com as

condições morfológicas próprias de cada local, permitindo discriminar valores de praia para praia.

#### 7.9.5. Transição perfil de barra/perfil de berma

Existem na literatura várias formulações que permitem relacionar as características da agitação com a possibilidade de um determinado sector costeiro transitar entre perfis característicos de erosão ou de acreção. No presente trabalho consideraram-se as equações testadas para dados de campo ou em tanques de larga escala, registando-se grande dispersão entre muitos dos limites expressos pelos vários autores e os valores obtidos para a zona de estudo. Este tipo de formulações foi, contudo, desenvolvido para variações de mesoescala e não para macroescala, pelo que a sua aplicação poderá não ser linear. Por outro lado, o conjunto de dados obtido para a área em estudo é notoriamente escasso para uma aferição cuidada dos limites propostos por cada autor. Há ainda que referir que apenas a formulação de Sunamura e Takeda (1984) engloba um parâmetro morfológico ( $\tan\beta$ ), pelo que apenas esta poderá ser aplicável praia a praia e não de forma genérica à globalidade do sector costeiro.

Após aplicação das equações consideradas, verificou-se que os critérios de Larson e Kraus ( $K = 5.5$  e  $c = 2$ ) e de Sunamura e Takeda ( $A = 17$ ) apresentaram menor desvio do que os restantes relativamente aos dados de campo podendo, como tal, evidenciar uma melhor adaptação à área de estudo. A utilização deste tipo de formulações (se possível mais testadas e com introdução de parâmetros morfológicos) permite conhecer de forma semi-qualitativa o comportamento da praia relativamente às condições de agitação incidentes e, como tal, estimar para que conjunto de características das ondas a praia emersa deverá transitar de um tipo de perfil para outro.

## 8. ESTUDOS MORFODINÂMICOS DE MESOESCALA - PARTE I (Variações diárias)

### 8.1. INTRODUÇÃO

O estudo da morfodinâmica de mesoescala, ou seja, das variações morfológicas que ocorrem entre algumas horas a alguns dias, num espaço de alguns metros a quilómetros, será efectuado para dois casos distintos, correspondentes a dois capítulos, com o mesmo título genérico (Estudos morfodinâmicos de mesoescala, partes I e II).

O primeiro sub-capítulo diz respeito às variações diárias geradas por agitação incidente de várias gamas, recorrendo-se à utilização de dados morfológicos e oceanográficos obtidos em campanhas específicas. Neste sub-capítulo utilizar-se-ão os dados obtidos para prever as condições de acreção/erosão ou de transição entre perfil de barra/perfil de berma e para verificar formulações de previsão de pendor da praia, de cota máxima da berma e de profundidade de remobilização.

O segundo sub-capítulo corresponde a um estudo das variações originadas no decorrer de temporais, utilizando-se modelos simples de previsão, sendo estes validados para dados de campo e aplicados a condições hipotéticas. Neste último estudo será dada relevância às variações morfológicas verificadas em cada local, bem como para a generalidade da área em questão.

### 8.2. RESULTADOS DAS CAMPANHAS

#### 8.2.1. Condições oceanográficas

Durante os dias das campanhas Tocha 92 e Areão 95 foram determinados valores de agitação na rebentação, durante a maré alta, por estimativa visual, de acordo com os procedimentos já descritos, no capítulo 2. Em Tocha 92, devido à existência de três linhas de rebentação distintas, foram estimados valores de altura da onda para cada uma das linhas existentes. Em Areão 95 apenas se observou uma única linha de rebentação, em maré alta, junto à face da praia. Os dados relativos às condições de agitação ao largo foram fornecidos pelo Instituto Hidrográfico, sendo

referentes à bóia-ondógrafo situada próximo da Figueira da Foz. Durante a campanha realizada na Praia do Areão, a bóia da Figueira da Foz não esteve em funcionamento, apenas existindo valores relativos à bóia-ondógrafo de Sines, cerca de 280 km a sul do local de observação. Na impossibilidade de usar dados mais próximos da Praia do Areão, optou-se pela utilização dos existentes, admitindo que o regime de agitação marítima ao largo não sofreu alterações significativas ao longo da costa oeste portuguesa, durante o período de análise. Contudo, por comparação directa dos valores obtidos (rebentação *versus* largo) verificou-se que as alturas ao largo (Sines) foram substancialmente mais elevadas do que as alturas registadas na rebentação sobre a face da praia (Praia do Areão), o que se pensou poder corresponder a alguma condição anómala. Essa diferença é, no entanto, resultado da dissipação de energia verificada ao longo do processo de aproximação da onda à costa, sobretudo nas zonas de empolamento e atenuação sobre a barra externa, pois mesmo não ocorrendo rebentação completa sobre a barra, esta contribui para uma diminuição da energia. Admitindo uma altura da onda incidente de 1.3 m (valor médio das observações em Sines durante a experiência) e usando a equação de previsão da dissipação de energia (5.6), espera-se uma redução na energia da onda em cerca de 80%, para a altura referida, ao que corresponderá a ocorrência na rebentação sobre a face da praia de uma onda com altura próxima de 0.76 m. A altura média da rebentação sobre a face da praia para a experiência Areão 95 foi de 0.88 m, valor próximo dos 0.76 m esperados, pelo que se podem considerar os dados de Sines como genericamente representativos das condições ao largo para a área em questão.

A totalidade dos dados relativos às condições de agitação estão expressos nas tabelas 8.1. (Areão 95) e 8.2. (Tocha 92).

**Tabela 8.1.** Dados de agitação para a experiência Areão 95.  $T_b$  = período médio das ondas na rebentação.

Dia - Hora	$H_{so}$ (m)	$H_b$ (m)	$T_{po}$ (s)	$T_b$ (s)	Rumo* (°)
11 - 16:00	1.27	1.12	11.8	11.0	306
12 - 16:10	1.90	1.37	13.3	12.4	306
13 - 18:00	1.53	0.90	12.5	11.3	314
14 - 18:00	1.10	0.72	11.8	10.2	310
15 - 18:30	1.03	0.58	10.5	9.6	316
16 - 18:30	1.17	0.86	11.1	9.6	332
17 - 18:30	0.92	0.64	11.1	10.3	314

\* Rumo ao largo

**Tabela 8.2.** Dados de agitação para a experiência Tocha 92.  $T_{po}$  = período de pico ao largo;  $T_{b2}$  = período médio das ondas na 2ª linha de rebentação;  $T_{b3}$  = período médio das ondas na 3ª linha de rebentação. ND = Não determinado.

Dia - Hora	$H_{10}$ (m)	$H_{b1}$ (m)	$H_{b2}$ (m)	$H_{b3}$ (m)	$T_{po}$ (s)	$T_{b2}$ (s)	$T_{b3}$ (s)	Rumo* (°)
29 - 09:00	2.11	2.5	1.4	0.6	13	ND	13.5	321
29 - 18:00	2.21	3.0	1.7	0.8	13	ND	13.5	316
30 - 09:30	1.95	2.75	1.2	0.6	8	10.8	9.7	287
30 - 18:00	2.79	3.0	1.55	0.65	9	11.4	10.8	291
1 - 10:00	3.95	4.5	1.9	0.85	15	13.7	12.0	298
1 - 17:30	4.43	5.0	1.8	0.6	15	14.5	12.6	317
2 - 09:30	4.69	4.5	1.75	0.75	15	15.4	15.5	316
3 - 09:30	5.04	4.75	1.6	0.8	14	14.1	13.5	310
4 - 10:00	5.48	5.5	1.7	0.9	15	13.3	12.4	316
5 - 15:00	4.43	4.0	1.65	0.8	13	12.5	12.5	308
6 - 13:30	2.78	2.5	1.8	1.0	12	11.4	10.1	310
8 - 14:00	4.50	5.0	2.1	1.0	13	12.8	13.1	310
9 - 16:30	2.38	3.0	1.65	0.8	11	10.8	10.9	321
10 - 14:30	3.41	3.5	1.6	ND	17	ND	ND	301
10 - 16:30	3.58	3.75	2.0	0.95	14.5	12.6	13.2	306
11 - 16:30	2.35	3.5	1.6	0.7	13.5	11.7	11.3	308
12 - 17:00	1.43	1.7	1.25	0.9	11.8	10.6	10.9	321
13 - 17:30	1.42	1.3	1.25	0.9	11.8	ND	9.5	327
14 - 10:00	1.37	1.5	ND	0.55	12.5	9.8	9.4	318
14 - 17:30	1.24	1.4	1.25	0.75	11.8	11.0	10.9	317
15 - 09:15	1.61	1.6	1.35	0.8	12.5	ND	11.6	285
16 - 09:15	6.72	6.5	1.9	0.9	13.3	12.3	11.6	302

\* Rumo ao largo

### 8.2.2. Morfologia e volumetria

As variações morfológicas foram registadas através da realização, em maré baixa, de perfis topográficos diários perpendiculares à linha de costa. Por forma a minimizar os erros induzidos por variações longilitorais (ex.: migração de formas rítmicas) foram executados 5 perfis espaçados de 25 m entre si, em Tocha 92, e 3 perfis espaçados de 35 m entre si, em Areão 95. Foram calculados os valores correspondentes ao pendor da face da praia e à cota do topo da berma, para todos os perfis. Foi ainda efectuada a comparação entre volumes sedimentares acima do nível médio do mar (NMM), para perfis obtidos em levantamentos consecutivos, determinando-se a variação volumétrica associada. Foi obtida uma média dos valores, para cada dia, determinando-se o comportamento médio da praia e, como tal, minimizando o efeito das variações laterais. Os dados obtidos estão expressos nas tabelas 8.3. (pendor da face da praia), 8.4. (cota do topo da berma) e 8.5. (variações volumétricas entre levantamentos).

**Tabela 8.3.** Pendores da face da praia para as experiências Tocha 92 e Areão 95. ND = Não determinado.

<b>Tocha 92</b>						
Dia	Perfil 50S	Perfil 25S	Perfil 0	Perfil 25N	Perfil 50N	Média
28/11	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.07
29/11	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08
30/11	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08
1/12	0.10	0.09	0.08	0.10	0.10	0.09
2/12	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09
3/12	ND	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08
5/12	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
6/12	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07
8/12	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
10/12	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
11/12	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06
13/12	0.07	0.06	0.08	0.09	0.10*	0.08
14/12	0.07*	0.07	0.08	0.12*	0.11*	0.09
15/12	0.09*	0.08	0.08	0.12*	0.11*	0.10
16/12	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>Areão 95</b>						
Dia	Perfil Norte	Perfil Central	Perfil Sul	Média		
10/4	ND	0.11	ND	0.11		
11/4	0.12	0.12	ND	0.12		
12/4	0.10	0.12	0.10	0.11		
13/4	0.11	0.11	0.10	0.11		
14/4	0.11	0.12	0.10	0.11		
15/4	0.11	0.11	0.11	0.11		
16/4	0.11	0.11	0.11	0.11		
17/4	0.10	0.12	0.10	0.11		

\* Formação de "beach cusps", correspondendo o declive à face da praia na parte próxima da crista dos "cusps".

Os pendores médios observados são praticamente constantes na campanha Areão 95, onde se obtiveram valores genericamente superiores aos observados na experiência de Palheiros da Tocha. Na campanha Tocha 92, as variações são maiores, estando o declive médio compreendido entre 0.06 e 0.09, existindo declives máximos de 0.12.

Relativamente aos pendores da face da praia, verificou-se que os valores apresentados na tabela 8.3. são genericamente inferiores aos utilizados para a determinação dos níveis de "runup". Tal diferença resulta dos níveis de "runup" terem sido calculados recorrendo apenas aos pendores existentes na parte superior da face da praia, atingida durante a maré alta, enquanto que os valores da tabela 8.3. integram a totalidade da face da praia, desde o topo da berma até ao final do perfil, com exclusão das zonas de lomba-canal.

Tabela 8.4. Cota da crista da berma referida ao Zero Hidrográfico, em metros, para os dados das experiências Tocha 92 e Areão 95. ND = Não determinado.

**Tocha 92**

Dia	Perfil 50S	Perfil 25S	Perfil 0	Perfil 25N	Perfil 50N	Média
28/11	6.71	6.82	7.18	7.05	6.94	6.94
29/11	6.66	6.81	7.14	7.05	6.94	6.92
30/11	6.66	6.70	7.10	6.98	6.86	6.86
1/12	6.64	6.70	7.08	7.16	6.90	6.90
2/12	6.72	6.76	6.68	7.00	6.96	6.82
3/12	ND	6.75	7.03	7.04	6.93	6.94
5/12	6.67	6.75	7.00	7.04	6.95	6.88
6/12	6.67	6.81	7.18	7.04	6.65	6.87
8/12	6.61	6.75	7.20	7.03	6.90	6.90
10/12	6.59	6.66	6.98	7.02	6.88	6.83
11/12	6.54	6.56	6.91	6.99	6.78	6.76
13/12	4.34*	5.14*	4.89*	5.20*	5.73*	5.08*
14/12	4.95*	4.70*	4.74*	5.26*	5.58*	5.05*
15/12	5.20*	5.01*	5.47*	5.01*	5.39*	5.22*
16/12	6.50	6.59	7.00	6.70	6.75	6.71

**Areão 95**

Dia	Perfil Norte	Perfil Central	Perfil Sul	Média
10/4	ND	5.93	ND	5.93**
11/4	5.84	5.86	ND	5.85**
12/4	5.83	5.49	5.02	5.45
13/4	5.86	5.52	5.15	5.51
14/4	5.93	5.70	5.17	5.60
15/4	5.79	5.61	5.27	5.56
16/4	6.08	5.74	5.21	5.68
17/4	6.10	5.84	5.28	5.74

\* Formação de um sistema de "beach cusps" com geração de uma segunda barra.

\*\* Valores provavelmente mais elevados por inexistência de levantamentos relativos ao perfil sul.

A interpretação dos valores relativos à cota da crista da berma (tabela 8.4.) deve considerar que estes poderão não estar de acordo com as condições do dia em que se procedeu ao registo, reflectindo condições anteriores. Por exemplo, durante marés vivas com ondulação de carácter construtivo, poder-se-á gerar uma berma com cota superior a 6 m ZH. Após alguns dias, em marés mortas, caso as condições de agitação não se alterem significativamente, a extensão do espraio não chegará ao topo da berma anterior, permanecendo o mesmo valor de crista, mas não correspondendo às condições de agitação e maré vigentes. Poderá ainda aparecer uma segunda berma, mais baixa, associada às novas condições de agitação, facto que se verificou entre os dias 13/12 e 15/12 na campanha Tocha 92, daí resultando um decréscimo na cota da crista da berma e um aumento no declive.

A observação dos dados da tabela 8.4., para a Praia do Areão, permite verificar que a cota da crista da berma decrescia para sul, com uma variação média superior a 0.7 m, entre locais que apenas distam entre si cerca de 70 m. Esta variação atingia a

totalidade da berma, incluindo um canal localizado entre a média e a alta praia, e induzia escoamento para sul da água que galgava a berma por acção do espraio.

Tabela 8.5. Variação volumétrica acima do NMM, em m<sup>3</sup>/m, entre levantamentos consecutivos, para as experiências Tocha 92 e Areão 95. ND = Não determinado.

Tocha 92						
Dias	Perfil 50S	Perfil 25S	Perfil 0	Perfil 25N	Perfil 50N	Média
28/29	-11.8	2.3	0.4	3.3	10.8	1.0
29/30	9.1	-1.0	-5.0	5.2	5.9	2.8
30/1	-3.3	8.9	7.5	17.2	10.4	8.1
1/2	9.7	8.9	4.4	-2.2	4.0	5.0
2/3	ND	-16.1	12.1	5.2	10.0	2.8
3/5	ND	8.5	2.9	2.1	17.2	7.7
5/6	-11.1	-4.0	-5.6	1.7	5.0	-2.8
6/8	9.3	10.9	7.3	-8.9	-13.7	1.0
8/10	-6.0	-7.1	-0.6	-10.1	-9.5	-6.7
10/11	-2.1	-2.0	-2.9	-2.4	-10.7	-4.0
11/13	14.3	6.9	-1.7	-7.7	-0.6	2.2 <sup>c</sup>
13/14	-0.1	-11.7 <sup>a</sup>	-9.0	-4.5 <sup>b</sup>	8.4	-3.4 <sup>d</sup>
14/15	-6.3	9.1	4.5	-3.0	1.8	1.2
15/16	-27.8	-13.4	-8.6	-17.2	-17.9	-17.0

Areão 95				
Dias	Perfil Norte	Perfil Central	Perfil Sul	Média
11/12	12.6	-13.5	ND	-0.5
12/13	-3.1	3.2	6.6	2.2
13/14	-5.8	2.2	8.7	1.7
14/15	6.6	-7.3	8.1	2.5
15/16	14.1	10.9	-8.0	5.7
16/17	-2.0	-1.9	0.0	-1.3

<sup>a</sup> Cava de "beach cusp"; <sup>b</sup> Próximo da crista de "beach cusp"; <sup>c</sup> Formação de lomba-canal e de 2<sup>a</sup> berma a afectar resultados criando erosão aparente, em situação de equilíbrio/acreção; <sup>d</sup> Formação de "beach cusps" a afectar resultados, criando ideia de erosão em situação de equilíbrio/acreção.

Da observação da tabela 8.5., respeitante aos valores de variação volumétrica diários, conclui-se da existência de fortes variações laterais, superiores às variações médias de acreção/erosão sentidas, sendo raros os dias em que todos os perfis têm o mesmo comportamento (erosão ou acreção). Assim, verifica-se a importância do recurso a mais do que um único perfil por forma a se aquilatar do comportamento médio da praia e minimizar (mas não eliminar) as variações atribuíveis a mudanças longilitorais. A formação de um sistema de lomba-canal e de lobos de praia ("beach cusps"), com geração simultânea de uma segunda berma, veio afectar os resultados entre os dias 13 e 15 de Dezembro de 1992, induzindo situações de erosão aparente.

Nas figuras 8.1. e 8.2., é possível ver a evolução dos perfis Tocha 0 (Tocha 92) e Areão C. (Areão 95), do início ao final das campanhas, dando uma ideia quer das variações volumétricas, quer das variações ocorrentes no pendor e na cota da berma.

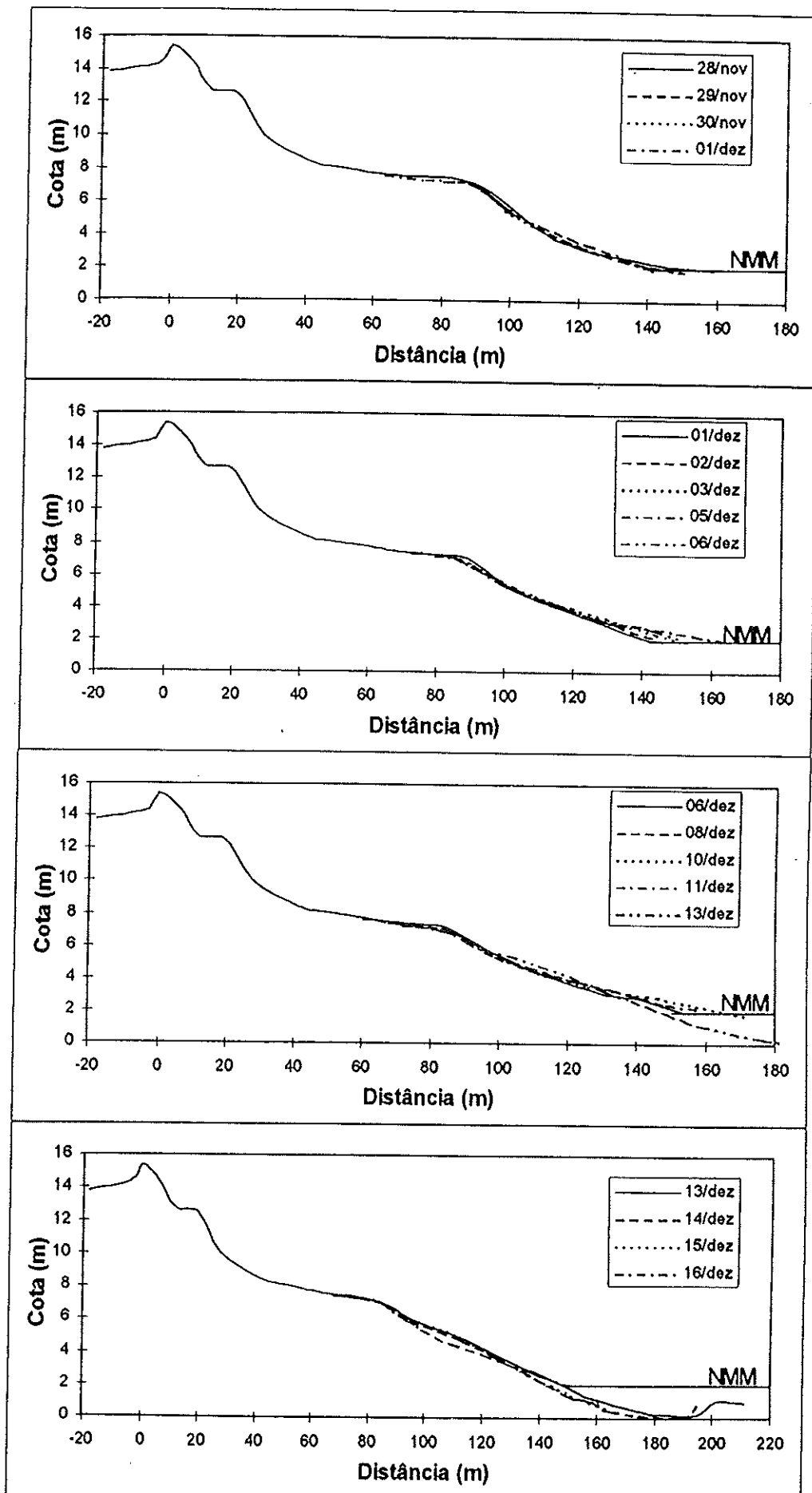


Figura 8.1. Evolução diária do perfil Tocha 0 durante a campanha Tocha 92 (cotas referidas ao ZH).

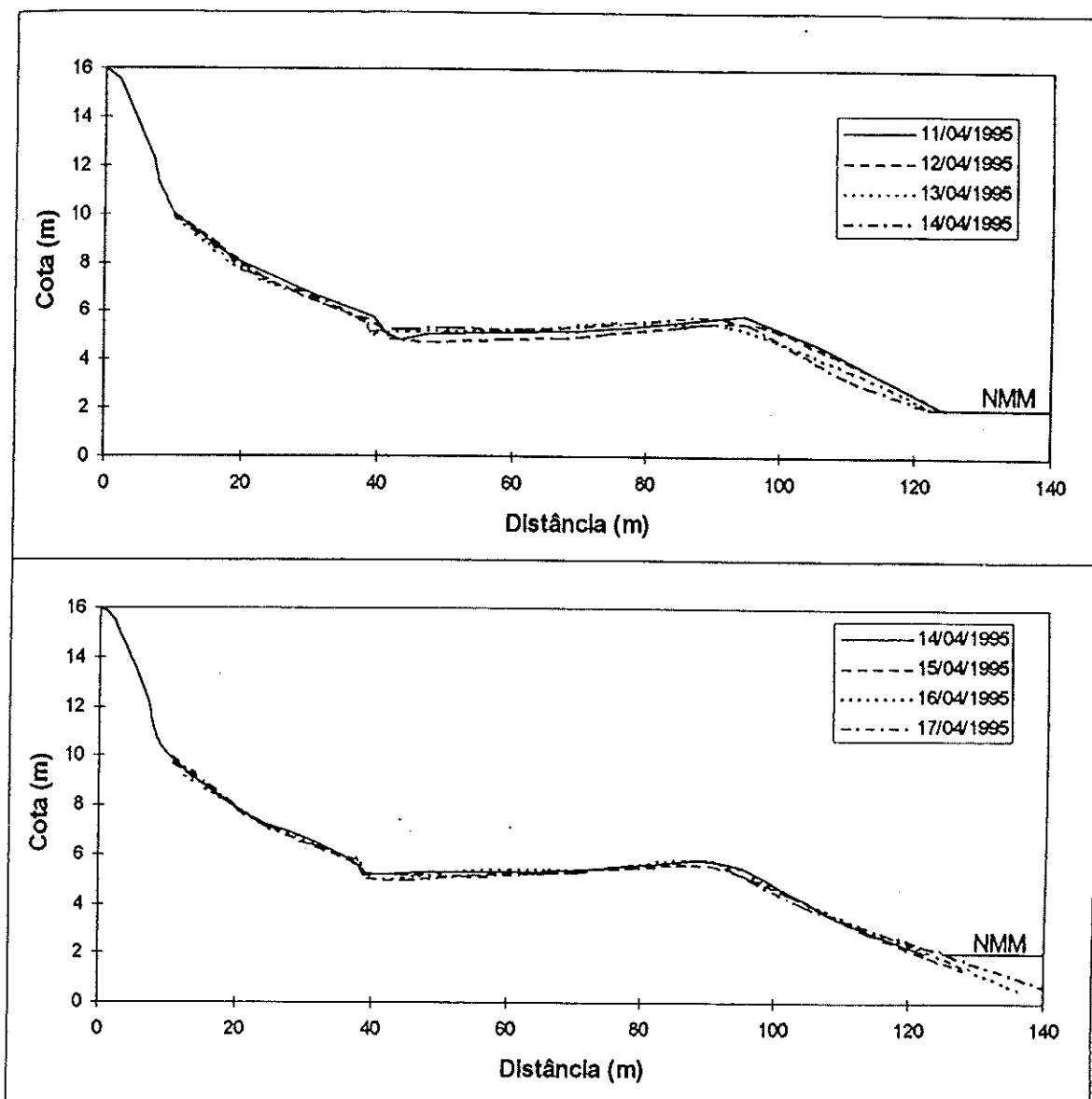


Figura 8.2. Evolução diária do perfil Areão C na campanha Areão 95 (cotas referidas ao ZH).

### 8.3. PARÂMETROS MORFODINÂMICOS

Tendo por base os dados morfológicos e oceanográficos recolhidos, foram calculados os valores dos parâmetros morfodinâmicos (definidos no capítulo 7) para cada dia, permitindo classificar as condições de rebentação e o estado da praia durante os períodos de análise. Nas figuras 8.3., 8.4. e 8.5. podem ver-se, respectivamente, as variações de  $\xi_b$ ,  $\varepsilon$  e  $\Omega$ , tendo sido utilizado neste último caso um valor de  $w_s = 0.07$  m/s, relativo a um diâmetro médio do grão de 0.5 mm, na face da praia. Todos os valores apontados são relativos a condições na face da praia, visto que neste capítulo apenas se considerarão variações morfológicas que afectem esta componente

morfológica, não se analisando o comportamento das barras, visto não existirem perfis batimétricos.

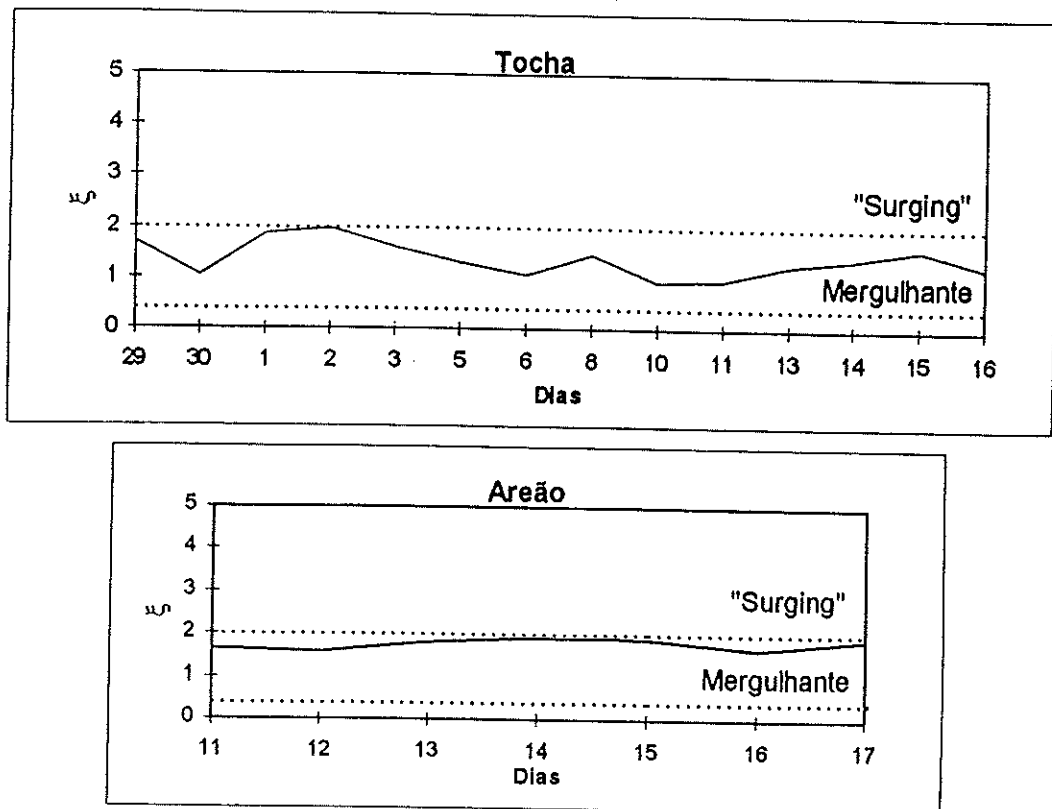


Figura 8.3. Tipo de rebentação prevista no decorrer de cada experiência, sobre a face da praia.

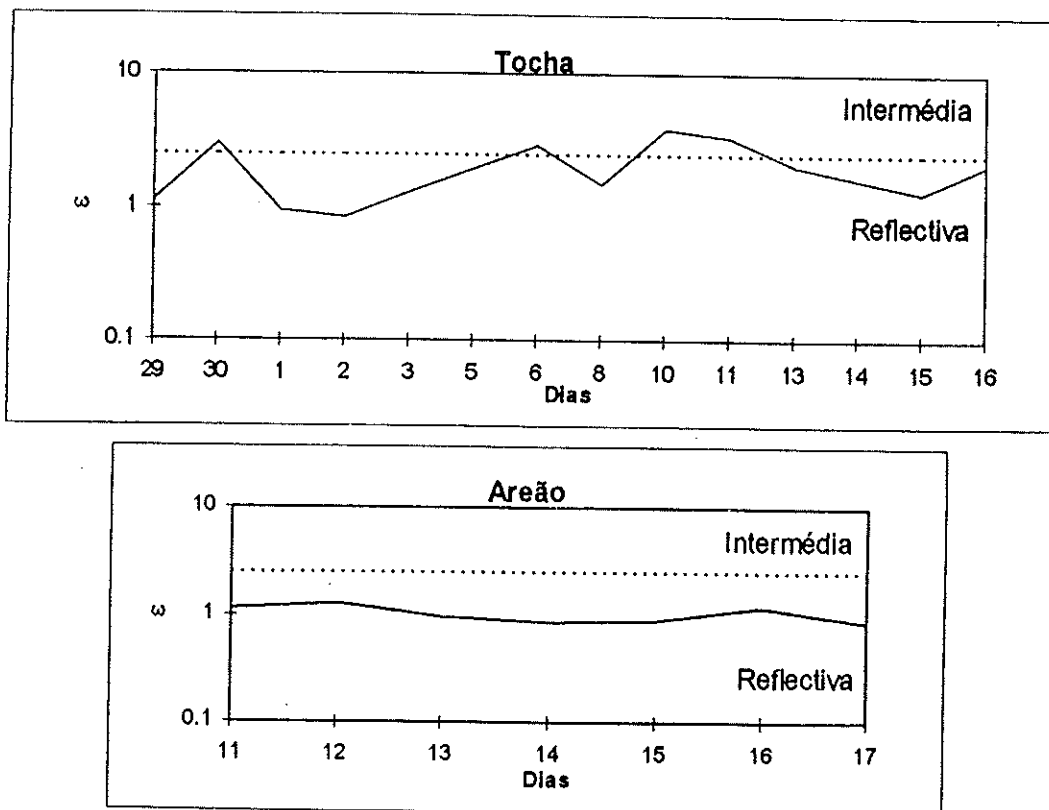


Figura 8.4. Variação prevista do comportamento da face da praia nas campanhas Tochá 92 e Areão 95, de acordo com o parâmetro  $\varepsilon$ .

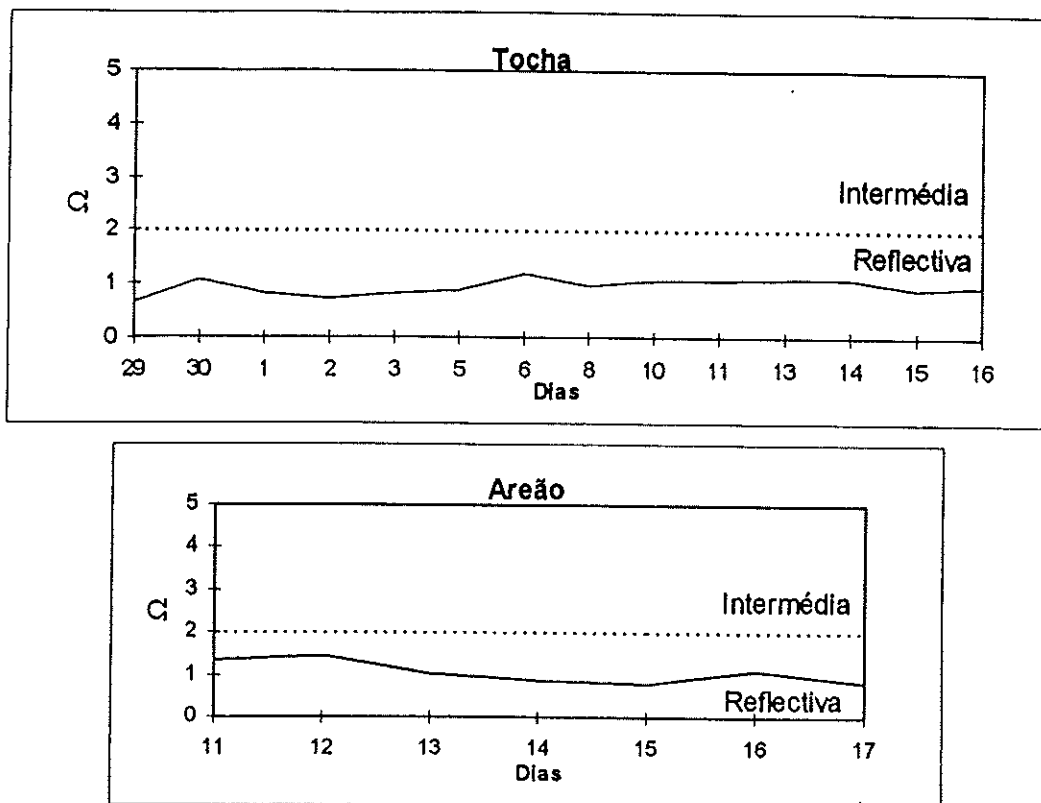


Figura 8.5. Variação do comportamento da face da praia nas campanhas Tocha 92 e Areão 95, de acordo com o parâmetro  $\Omega$ .

O “surf similarity parameter” variou entre 0.9 e 2.0, indicando a existência de rebentação dominante do tipo mergulhante sobre a face da praia, o que coincidiu com o observado, no decorrer das duas campanhas. O comportamento da face da praia, classificado através do “surf scalling parameter”, que variou entre 0.8 e 3.8, correspondeu a condições reflectivas a intermédias, ainda que em apenas 4 dos dias analisados (referentes à campanha Tocha 92) se indiquem características intermédias. O parâmetro de Dean, ao variar entre 0.7 e 1.5 indica características genericamente reflectivas, sobretudo se considerarmos como limite o valor 2, proposto por Masselink (1994), em detrimento do valor 1, inicialmente indicado por Wright e Short (1984). A indicação de existência de condições predominantemente reflectivas no decorrer das experiências corresponde, efectivamente, ao verificado no campo.

#### 8.4. TRANSIÇÃO BARRA/ BERMA (EROSÃO *VERSUS* ACREÇÃO)

##### 8.4.1. Análise das variações morfológicas diárias

A análise dos resultados expressos nas tabelas 8.3. (declive da face da praia) e

8.5. (variação volumétrica entre levantamentos consecutivos), conjuntamente com a interpretação visual dos perfis permite extrair algumas conclusões relativamente ao comportamento genérico das praias analisadas, em cada campanha.

### Tocha 92

A principal conclusão a retirar da análise conjunta dos perfis e das diferenças dos volumes sedimentares diz respeito à elevada variação lateral existente entre os cinco locais utilizados (Tocha 50S a Tocha 50N), tendo sido pouco frequente a observação de convergência na tendência de comportamento para todos os locais. Estas variações estiveram inicialmente associadas à existência e movimentação de um sistema de lobos de praia ("beach cusps"). Posteriormente, gerou-se um novo sistema de lobos de praia, localizado a meio da face da praia anterior e sobreposto ao inicial, responsável por novas variações laterais. A análise conjunta dos vários perfis permitiu a obtenção de um valor médio de comportamento, em vez da obtenção do valor relativo a um único perfil, provavelmente não representativo da globalidade das condições vigentes.

Nos primeiros dias de campanha, 28 a 30 de Novembro, verificou-se uma variação dos perfis, em geral pouco acentuada, com ligeiro predomínio de acreção e ligeiro aumento no declive da praia (figura 8.6.).

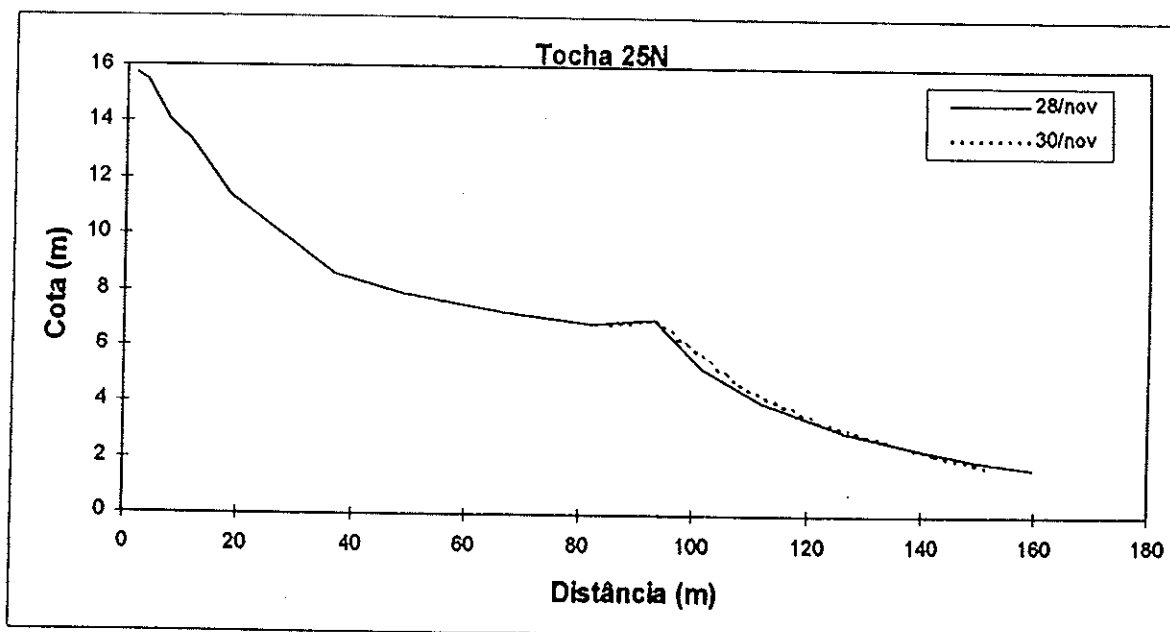


Figura 8.6. Evolução do perfil entre 28 e 30 de Novembro de 1992 (cotas referidas ao ZH).

Entre os dias 1 e 5 de Dezembro, a tendência de variação volumétrica continuou a ser de acreção, ainda que associada a uma diminuição do declive da face da praia, o que está, em primeira análise, em contradição com a tendência acrecionária. Efectivamente, registou-se uma erosão do topo da face da praia e recuo da crista da berma, com conseqüente diminuição do pendor na parte inferior da face da praia, gerando-se aí um aumento volumétrico evidente. No entanto, existiu uma clara transição para um perfil mais dissipativo, associado a uma resposta da praia a condições de agitação mais energéticas (figura 8.7.). Neste caso, tornou-se evidente que os valores globais de acreção não estavam de acordo com a tendência de geração de perfil de barra e com a verificada erosão da berma. Tal facto pode ser interpretado como um ajuste da praia às variações nas condições de agitação, até obter um perfil em equilíbrio dinâmico. A existência de acreção na base da face da praia, com um valor superior à erosão da crista da berma poderá, ainda, denotar um bom comportamento inicial da praia a condições adversas, provavelmente devido à existência de um armazenamento sedimentar suficiente.

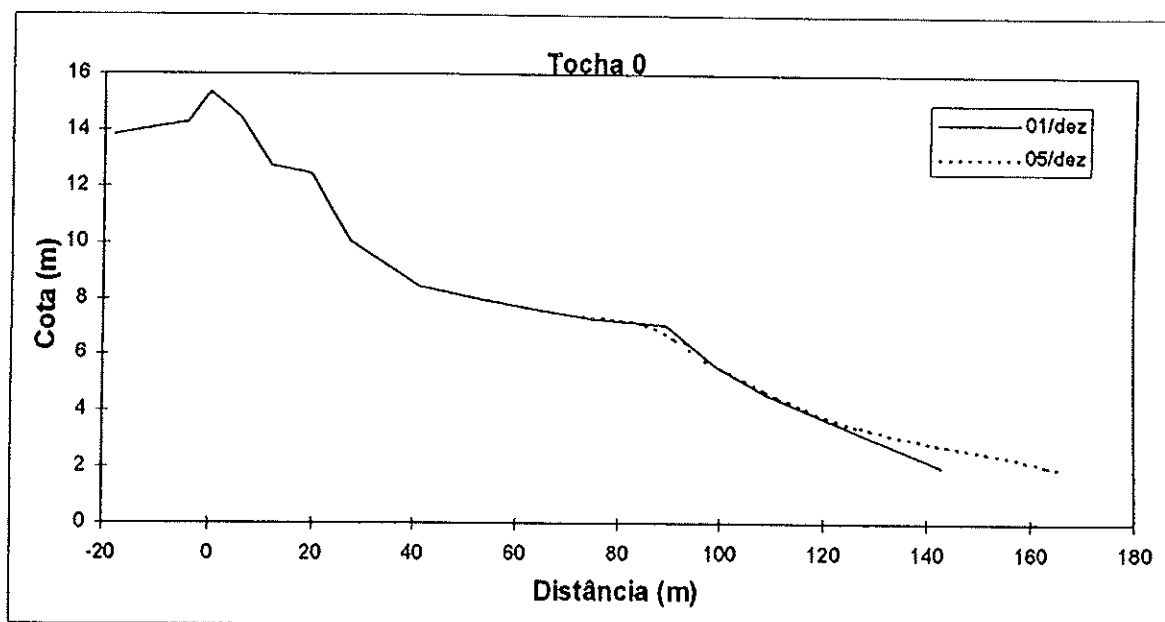


Figura 8.7. Evolução do perfil entre 1 e 5 de Dezembro de 1992 (cotas referidas ao ZH).

Entre os dias 6 e 11 de Dezembro manteve-se o processo de erosão da crista da berma, mas desta feita acompanhado pela completa deslocação da face da praia para o interior, daí resultando uma ligeira diminuição do "stock" arenoso (figura 8.8.). Os dias 10 e 11 correspondem, em geral, aos dias com valor de declive da face da praia mais baixo de toda a campanha, em acordo com a tendência erosiva e com a transição

para um perfil ligeiramente mais dissipativo.

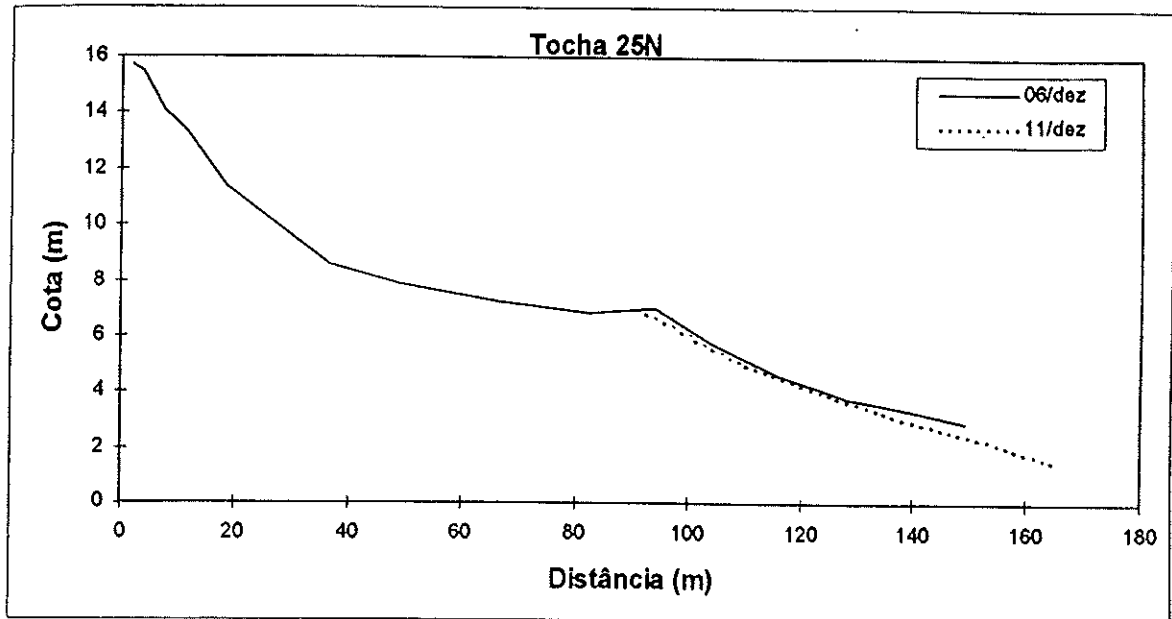


Figura 8.8. Evolução do perfil entre 6 e 11 de Dezembro (cotas referidas ao ZH).

Dos dias 13 a 15 de Dezembro registou-se a formação de uma segunda berma, mais pequena, localizada a meio da anterior face da praia (figura 8.9.), indicando condições de acreção com tendência para geração de perfis do tipo berma. No entanto, à formação desta berma na parte média a superior da face da praia correspondeu uma erosão da parte inferior e uma aproximação a terra de um sistema lomba-canal ("ridge and runnel"), daí resultando um notório aumento do declive da face da praia, mas um valor quase nulo na comparação global entre volumes erodidos e acrecionados.

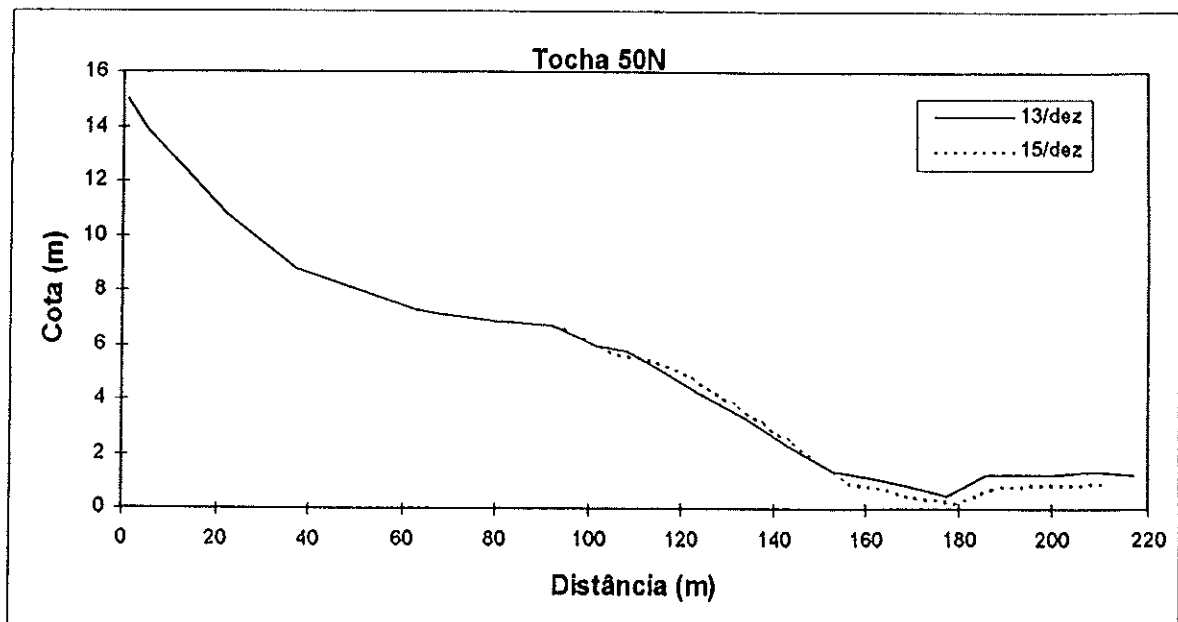


Figura 8.9. Evolução do perfil entre 13 e 15 de Dezembro de 1992, para situação de crista de "beach cusp" (cotas referidas ao ZH).

A formação de um novo sistema de "beach cusps", associado à nova berma, fez com que o desenvolvimento da crista da berma não fosse evidente ao longo de todos os perfis, induzindo situações em que se poderia julgar estar-se na presença de estabilidade, ou até, de erosão, pelo facto do perfil efectuado coincidir com a cava da "beach cusp" (figura 8.10.).

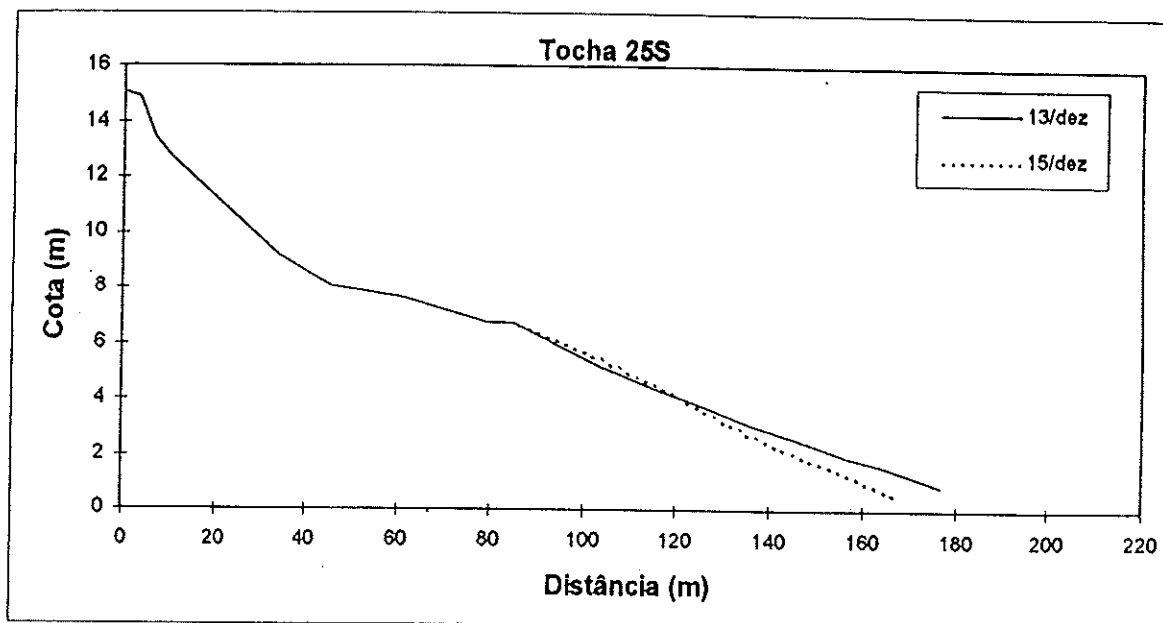


Figura 8.10. Evolução do perfil entre 13 e 15 de Dezembro de 1992, para uma situação de cava de "beach cusp" (cotas referidas ao ZH).

Torna-se necessário mencionar que as diferenças volumétricas obtidas, só por si, não representam de forma absolutamente correcta a transição para perfil de berma verificada entre 13 e 15 de Dezembro, estando tal comportamento expresso de forma evidente no aumento do pendor médio da face da praia de 0.06 (dia 11) para 0.09 (dias 14 e 15), e na formação de nova berma.

Entre os dias 15 e 16 de Dezembro observou-se uma tendência geral de erosão acentuada (valor médio de  $17 \text{ m}^3/\text{m}$ ) acima do NMM, associada à completa erosão da berma recentemente formada, ao recuo da crista da berma superior e da totalidade da face da praia, com diminuição geral do pendor. Isto é, verificou-se notória tendência de geração de um perfil mais dissipativo, sem formas rítmicas e com menores variações longilitorais, associado a uma situação de agitação incidente mais energética (figura 8.11.).

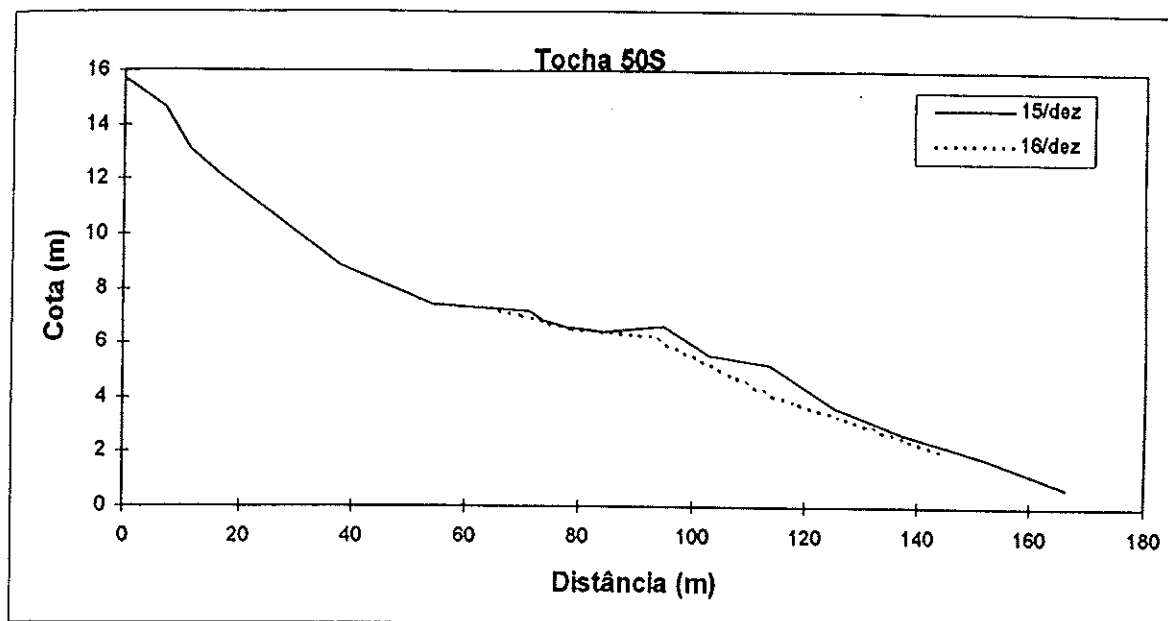


Figura 8.11. Evolução do perfil entre 15 e 16 de Dezembro de 1992 (cotas referidas ao ZH).

### Areão 95

Durante a campanha Areão 95 verificou-se, igualmente, a existência de uma importante variação lateral nas diferenças volumétricas entre levantamentos, não existindo nenhuma comparação entre levantamentos consecutivos onde as diferenças fossem todas positivas ou todas negativas. As referidas variações laterais não se ficaram a dever a alterações da posição dos lobos de praia mas a reajustamentos da parte superior da berma que, atingida pelo mar durante a maré alta, evidenciou modificações e variações volumétricas mais importantes do que a própria face da praia. Esta última, manteve uma posição e um pendor relativamente constantes ao longo de toda a campanha, não tendo sido possível evidenciar uma clara tendência de erosão/acreção.

A tendência geral expressa na tabela 8.5., para um ligeiro predomínio da acreção relativamente à erosão, não se ficou a dever a variações associadas à face da praia ou a deslocações significativas da crista da berma em determinada direcção, mas sim a um robustecimento da parte superior da berma através da deposição de material transportado pelo espraio da onda ("swash"). Tal situação pode ser considerada como indicadora de uma tendência geral para o desenvolvimento de um perfil do tipo berma (figura 8.12.).

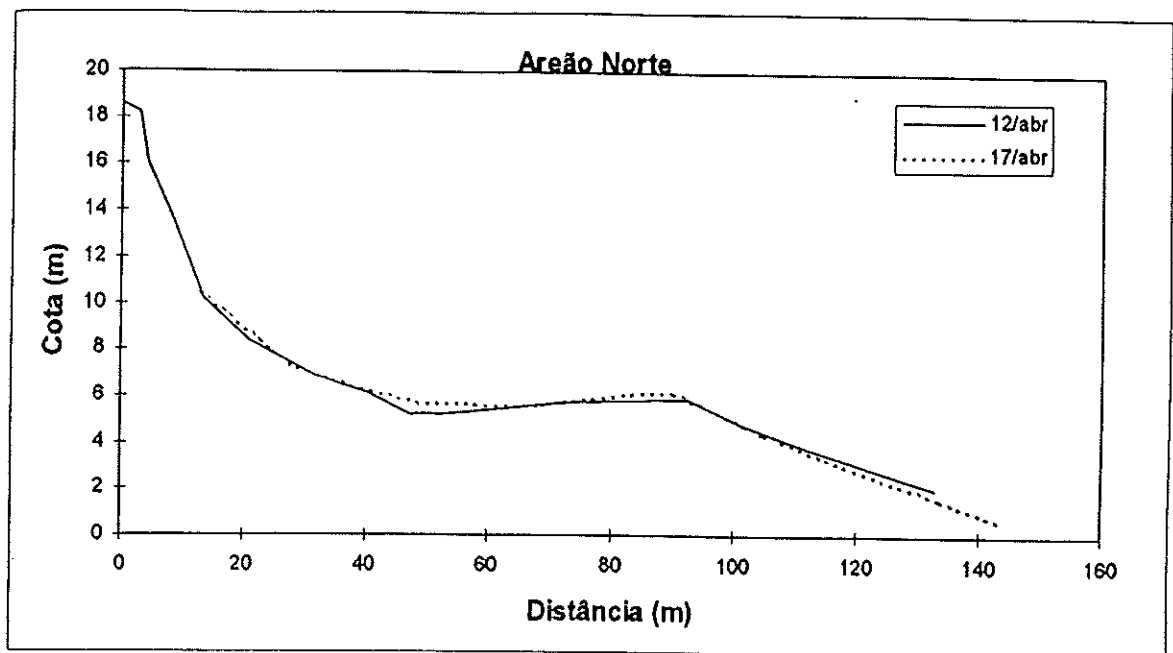


Figura 8.12. Variação do perfil entre 12 e 17 de Abril de 1995, em Praia do Areão (cotas referidas ao ZH).

#### 8.4.2. Variações volumétricas *versus* previsões

As formulações teóricas existentes para a previsão das variações no perfil de praia (transição perfil de barra/perfil de berma ou erosão/acrecção) foram testadas com os dados obtidos no campo, utilizando-se neste ponto apenas os valores relativos à diferença volumétrica entre perfis consecutivos, não se considerando o tipo de perfil em desenvolvimento. Os conceitos teóricos e as formulações utilizadas neste estudo foram já apresentados e desenvolvidos no sub-capítulo 7.8..

Para cada intervalo entre levantamentos topográficos consecutivos das campanhas Tocha 92 e Areão 95, foram determinados os valores médios de  $H_{so}$  e de  $T_p$  (tabela 8.6.). Estes valores foram utilizados nas equações 7.11 a 7.19 para obtenção dos coeficientes  $K$ ,  $K'$ ,  $M$ ,  $c$ ,  $P$ ,  $A$  e  $N$ , entre cada dois levantamentos. Para a determinação de  $N$  utilizaram-se valores de  $H_{b1}$  correspondentes à estimativa visual, entre levantamentos, para a primeira linha de rebentação (tabela 8.6.). Para os cálculos, foi ainda necessário considerar um valor de  $w_s = 0.07$  m/s, relativo a uma granulometria média de 0.5 mm, e um valor de declive da face da praia ( $\tan\beta$ ), tendo-se neste último caso recorrido ao valor do declive do segundo levantamento, resultante da actuação da agitação incidente no tempo decorrido entre os dois levantamentos (tabela 8.6.).

Tabela 8.6. Valores utilizados no cálculo dos parâmetros relativos à separação entre tendências de acreção ou erosão.

Dias	H <sub>so</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	tanβ	H <sub>bl</sub> (m)
<b>Tocha 92</b>				
28/29	2.28	12.7	0.08	2.5
29/30	2.04	11.5	0.08	2.9
30/1	3.40	13.6	0.09	3.75
1/2	4.40	17.0	0.09	4.75
2/3	4.69	13.9	0.08	4.75
3/5	4.72	13.3	0.07	4.75
5/6	3.37	12.1	0.07	4.0
6/8	4.55	12.9	0.07	3.75
8/10	3.42	13.5	0.06	3.25
10/11	3.20	14.3	0.06	3.6
11/13	1.77	12.4	0.08	1.7
13/14	1.40	12.0	0.09	1.4
14/15	1.40	12.1	0.09	1.4
15/16	6.13	12.4	0.07	6.5
<b>Areão 95</b>				
11/12	1.26	11.8	0.11	1.1
12/13	1.90	13.3	0.11	1.4
13/14	1.53	12.5	0.11	0.9
14/15	1.10	11.8	0.11	0.7
15/16	1.03	10.5	0.11	0.6
16/17	1.17	11.1	0.11	0.9

Na figura 8.13. apresentam-se os valores dos vários índices calculados, comparados com os valores médios de erosão ou de acreção determinados entre levantamentos consecutivos. As letras A e E significam, respectivamente, acreção e erosão, sendo o sinal ' correspondente à previsão, de acordo com a fórmula utilizada, e a inexistência de sinal relativa ao valor de campo. Os pontos colocados nos quadrantes com indicações AE' ou EA' correspondem a situações em que as previsões não coincidiram com a variação volumétrica obtida, tendo sinal oposto. Os pontos situados em quadrantes com designação EE' ou AA' correspondem à coincidência entre tendência erosiva ou acrecionária prevista e observada, respectivamente.

Pela observação dos vários gráficos da figura 8.13., é visível a inadequação de qualquer das formas de previsão à comparação entre volumes observados. Para as várias formulações empregues e para o conjunto de 20 pontos analisados, entre as duas campanhas, verifica-se que o número de previsões erradas (AE' + EA') se situa entre 40% e 50% das observações. Observa-se, ainda, que alguns dos valores são sempre previstos de forma incorrecta, independentemente do método. Tais valores dizem respeito aos volumes obtidos entre 30 de Novembro e 5 de Dezembro, onde a acreção registada não está de acordo com a tendência erosiva da berma e com a passagem para

condições mais dissipativas, como explicado anteriormente (figura 8.7.).

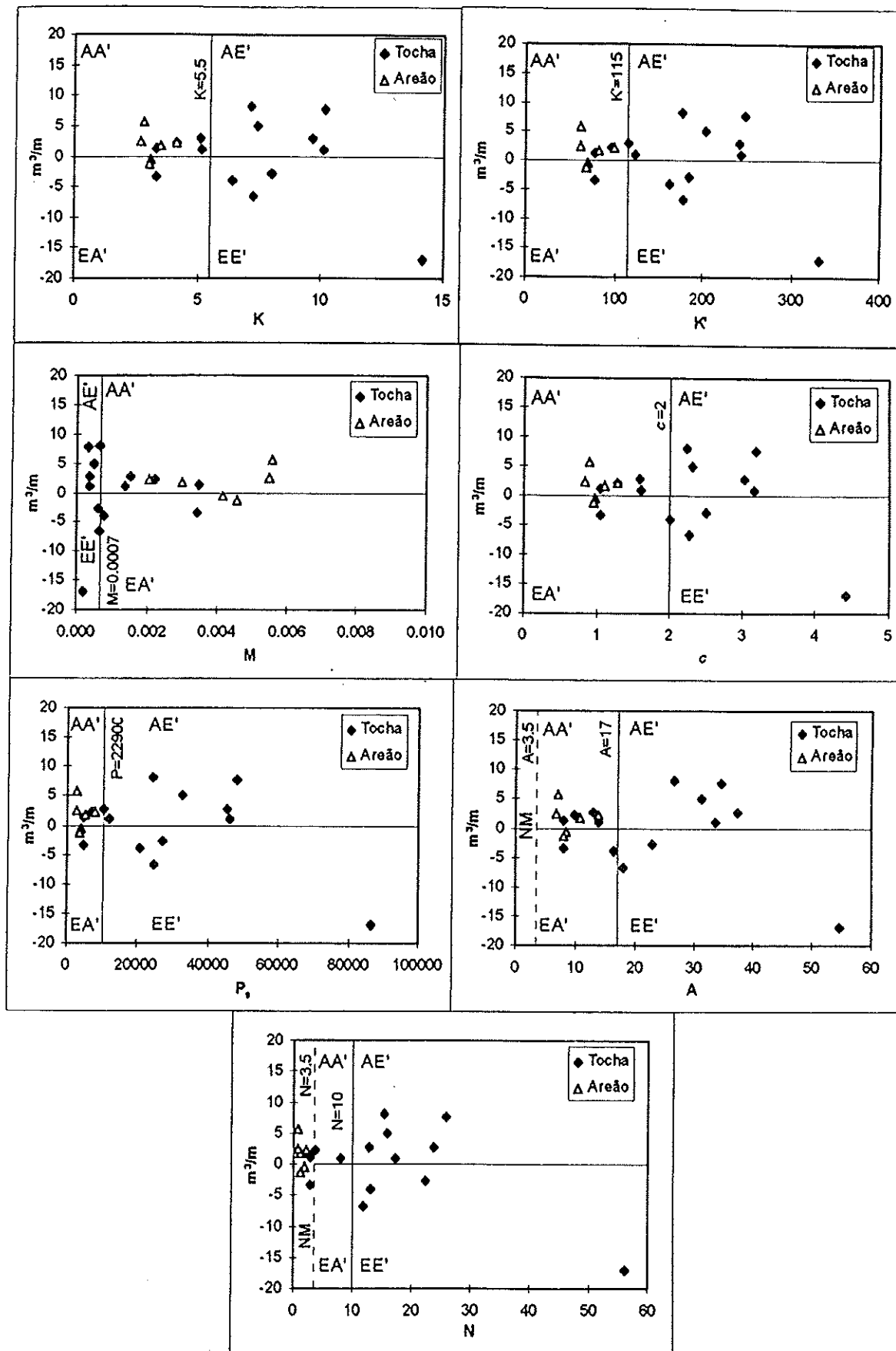


Figura 8.13. Comparação entre tendências volumétricas de erosão/acreção reais e as previstas pelos vários métodos testados. AA' e EE' indicam concordância entre previsões e observações de campo. AE' e EA' indicam diferenças entre previsões e observações. NM = Inexistência de movimento.

Outra situação de desacordo consistente é relativa ao volume entre os levantamentos dos dias 13 e 14 de Dezembro, que tendo sido negativo, indica erosão numa situação notória de geração de perfil de berma, verificada no campo e prevista pelos métodos. Relativamente à campanha Areão 95, verifica-se que dois dos volumes obtidos apresentam valores ligeiramente negativos a nulos, em desacordo com as previsões dos vários métodos que indicam tendência acrecionária durante toda a campanha.

Regista-se, assim, a dificuldade ou, até, impossibilidade de aplicação das formulações utilizadas à área de estudo, para condições de variação diária (mesoescala), através da comparação directa com a diferença volumétrica (erosão/acrecção) entre levantamentos. Tal poderá estar relacionado com:

i) o perfil de praia necessitar de algum tempo de resposta para atingir um equilíbrio relativo às variações nas condições de agitação vigentes;

ii) as fortes variações laterais existentes (a média volumétrica pode ser fortemente influenciada pela existência de um único perfil com sentido evolutivo oposto ao dos restantes perfis);

iii) muitos dos casos analisados corresponderem a situações onde a variação volumétrica (acrecção/erosão) foi muito reduzida.

Efectivamente, apenas em algumas excepções, como a ocorrência de uma situação extrema (temporal de 15 a 16 de Dezembro de 1992), foi possível observar uma resposta quase directa e evidente da praia relativamente ao mecanismo forçador, traduzida em variação volumétrica apreciável, com tendência semelhante nos cinco locais de análise.

Em conclusão, pode referir-se que as comparações volumétricas só por si não conseguiram traduzir situações evolutivas bem definidas, a não ser em eventos extremos, onde o comportamento ao longo da praia foi uniforme.

#### 8.4.3. Comportamento do perfil *versus* previsões

Os diversos autores que desenvolveram estudos com vista à utilização de fórmulas de previsão do comportamento da praia, têm preferido a utilização de uma designação morfológica entre tipos de praia distintos, em detrimento do recurso aos

valores volumétricos simples, referentes a acreção ou erosão da praia emersa. Admitem apenas a existência de uma transferência sedimentar perpendicular à praia, considerando tanto a praia emersa como a praia submersa. Assim, de forma preferencial, os autores indicam transições barra/berma, admitindo dois estados de perfis extremos, estando a transição para o perfil de barra associada a condições de energia elevada, enquanto que as mudanças para um perfil predominante de berma ocorrem em condições de baixa energia, também frequentemente referidas como “normais”.

Procedeu-se, então, à determinação do comportamento entre levantamentos relativamente a estas duas tipologias referidas, não considerando os volumes sedimentares calculados, e utilizando como bases para a análise das campanhas estudadas, os seguintes elementos:

a) a diminuição do pendor médio da face da praia, entre levantamentos consecutivos, indica uma tendência para a ocorrência de um perfil mais dissipativo, associado a erosão da crista da berma e/ou da parte superior da face da praia, correspondendo a uma transição para uma situação de perfil de barra (figura 8.7.);

b) o aumento do declive médio da face da praia entre levantamentos consecutivos, evidenciando um incremento da crista da berma ou a formação de uma nova berma, indica a transição para uma situação de perfil de berma (figura 8.9.);

c) a manutenção do mesmo pendor da face da praia, entre levantamentos, indica situação de equilíbrio caso a posição da face da praia se mantenha estacionária. Se existir deslocação da face da praia para o interior, ocorre uma transição para perfil de barra (figura 8.8.) e caso se verifique uma deslocação da face da praia para o largo, está-se na presença de um robustecimento do perfil de berma;

d) a manutenção do mesmo pendor e da mesma posição da face da praia, associada a galgamento do topo da berma pelo espraio, com deposição de material na parte superior da berma, indica robustecimento do perfil de berma (figura 8.12.).

Tendo por base os quatro pontos mencionados, construiu-se a tabela 8.7., onde se apresentam as tendências dominantes entre cada dois levantamentos consecutivos, sendo estas designadas como Berma, para perfis em situação de formação ou robustecimento da berma, e de Barra, para perfis onde na parte emersa ocorra erosão de formas, recuo da berma ou passagem a comportamento mais dissipativo. Quando não se verificou uma tendência significativa para qualquer dos tipos de evolução

apontados, optou-se pela designação "Estável". Em alguns casos, assinalam-se duas possibilidades (Estável/Barra ou Estável/Berma), por não ser possível definir correctamente o tipo de comportamento predominante, considerando-se qualquer deles como igualmente provável. Na mesma tabela, estão ainda evidenciados os comportamentos esperados de acordo com cada método de previsão, usando como limites os valores propostos na literatura, previamente apresentados na tabela 7.18. Para os parâmetros A e N, não se considerou o limite 3.5, abaixo do qual não seriam esperadas quaisquer variações na praia, por poder induzir erros adicionais.

**Tabela 8.7.** Comportamento observado e previsto entre levantamentos consecutivos. Be - Berma; Ba - Barra; E - Estável; E/Be - Estável/Berma; E/Ba - Estável/Barra. Os asteriscos indicam as situações onde o comportamento observado e o comportamento previsto não é coincidente, para cada método utilizado.

Dias	Comportamento observado	K	K'	M	c	P	A	N
<b>Tocha 92</b>								
28/29	Berma	Be	Ba*	Be	Be	Ba*	Be	Be
29/30	Estável/Berma	Be	E	Be	Be	E	Be	Ba*
30/1	Berma	Ba	Ba*	Ba*	Ba*	Ba*	Ba*	Ba*
1/2	Barra	Ba*	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
2/3	Barra	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
3/5	Barra	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
5/6	Estável/Barra	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
6/8	Barra	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
8/10	Barra	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
10/11	Estável/Barra	Ba	Ba	Be*	E	Ba	Be*	Ba
11/13	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
13/14	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
14/15	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
15/16	Barra	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba
<b>Areão 95</b>								
11/12	Estável	Be*	Be*	Be*	Be*	Be*	Be*	Be *
12/13	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
13/14	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
14/15	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
15/16	Berma	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
16/17	Estável/Barra	Be*	Be*	Be*	Be*	Be*	Be*	Be *

Verifica-se um melhor ajuste de todos os métodos relativamente ao tipo de comportamento do perfil do que relativamente ao volume de erosão/acreção, com uma concordância geral dos métodos entre 80% e 85% dos casos.

De entre os 20 casos analisados, três deles possuíram tendências observadas sempre distintas das previsões, independentemente do método usado. Dois (11/12 e 16/17 de Abril de 1995 - Areão 95) correspondem a situações onde a variação existente foi extremamente pequena, sendo difícil verificar uma tendência nítida de

acrecção ou de erosão, no campo. No outro caso (30/1 de Novembro de 1992 - Tocha 92) regista-se efectivamente uma tendência de aumento de robustez da berma, para condições de agitação relativamente energéticas, após um período acrecionário, o que poderá ser justificado pela necessidade de um tempo de resposta da praia relativamente às variações na agitação incidente. Por outro lado, não é de estranhar que para levantamentos cujos valores teóricos sejam próximos dos limites de comportamento propostos ocorram situações anómalas, visto que tais limites não deverão corresponder a um valor único mas a uma gama de valores, dentro dos quais a praia estabelecerá a sua possibilidade de transição entre comportamentos.

Na comparação entre métodos, regista-se que o método inicialmente proposto por Dean (1973), utilizando o valor limite  $K = 5.5$  (Larson e Kraus, 1989), e que a determinação utilizada por Larson e Kraus (1989), com  $c = 2$ , são os que produzem previsões mais próximas das observações, com erro apenas nos três casos atrás descritos. Os valores de  $H_b$  utilizados para a campanha Tocha 92 são relativos à primeira linha de rebentação (sobre a barra externa). A utilização de valores de rebentação sobre a face da praia (3ª linha de rebentação) foi igualmente testada mas produziu previsões perfeitamente inadequadas, com tendência prevista para a geração de perfis de berma, em todos os casos, dado que a altura da rebentação na face da praia foi sempre igual ou inferior a 1.0 m.

Na figura 8.14., pode observar-se o conjunto de dados obtidos em Tocha 92 e Areão 95, estando representados os valores limite dos coeficientes ( $K$ ,  $K'$ ,  $M$ ,  $c$ ,  $P$ ,  $A$  e  $N$ ) propostos pelos autores (linhas finas) e possíveis ajustes para a área em questão (traços grossos).

A análise da figura 8.14 permite verificar que os valores limite dos coeficientes  $K$  e  $c$ , propostos por Larson e Kraus (1989), são aqueles que melhor se adequam aos dados obtidos, estando próximos dos ajustes mais adequados e prevendo correctamente os comportamentos em 85% dos casos utilizados. Os valores limite inicialmente propostos pelos autores para os restantes coeficientes produzem erros ligeiramente superiores, entre 20% e 25%.

Foi testado, para todos os casos, um novo valor limite, adequado aos dados utilizados. Contudo, nenhum dos novos valores propostos permite reduzir o erro a menos de 15% das observações, pelo que nenhum dos novos limites permite melhorar os resultados já alcançados com a utilização dos limites iniciais de  $K$  e  $c$ .

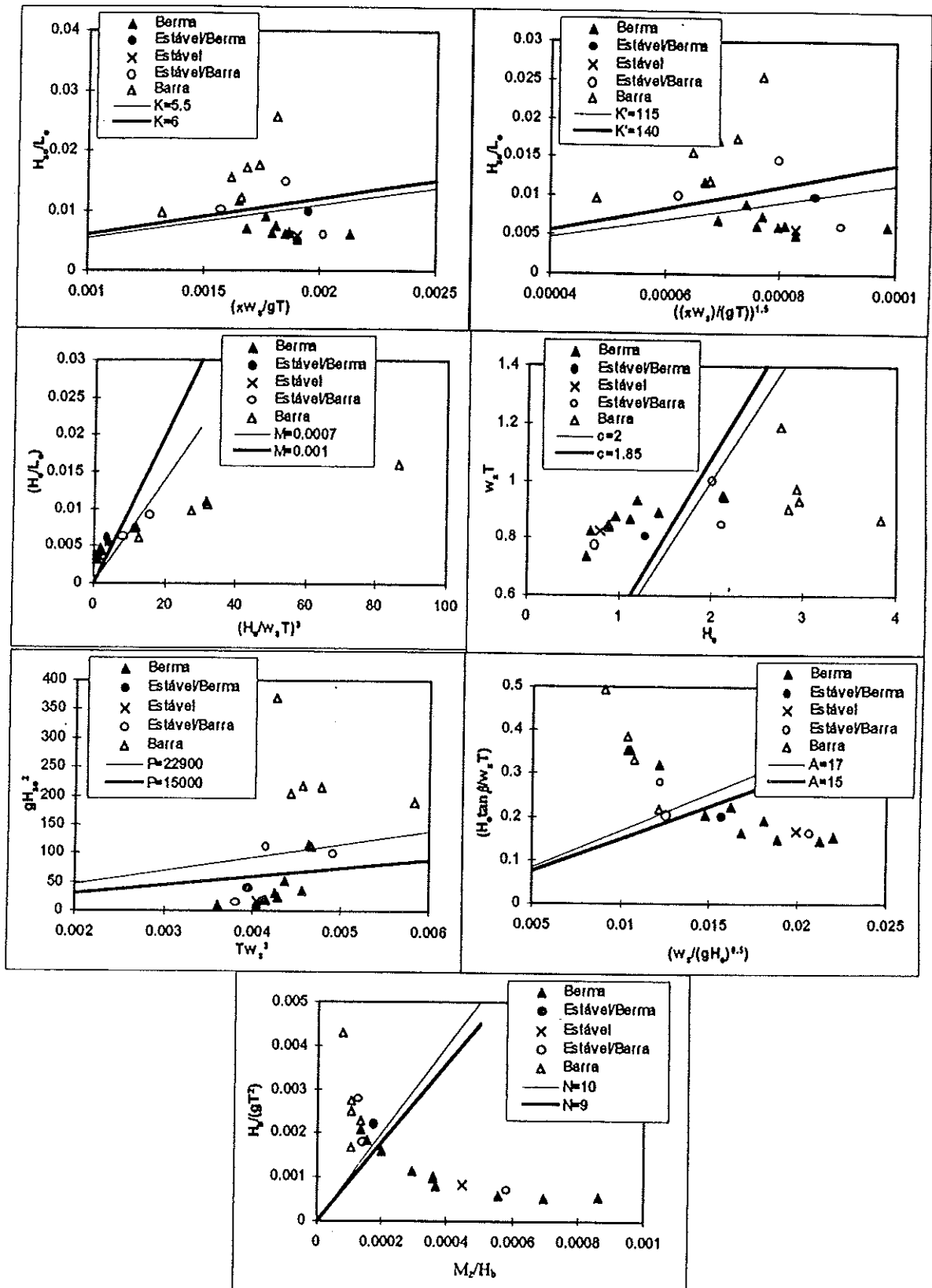


Figura 8.14. Avaliação dos limites de cada método relativamente aos dados obtidos e propostas de novos ajustes (linhas grossas).

A análise efectuada baseia-se num conjunto de observações relativamente restrito (20 registos), ainda que abrangendo uma vasta gama de condições de agitação.

Para uma melhor definição dos limites a considerar para a área de estudo, será necessário um número superior de dados.

Observando atentamente a figura 8.14. (coeficiente  $c$ ), é curioso registar que a simples utilização de um dos parâmetros (altura média da onda ao largo) possibilitaria uma separação tão eficaz como a de qualquer dos outros parâmetros a que se recorreu neste estudo, caso se optasse por um valor de  $\bar{H}_o$  entre 1.6 m e 1.9 m, ao que correspondem valores de  $H_{so}$  de 2.6 m e 3.0 m, respectivamente, admitindo uma distribuição de Rayleigh. Usando, por exemplo, o valor médio do intervalo ( $\bar{H}_o = 1.75$  m) ou a equivalente altura significativa ( $H_{so} = 2.8$  m), conclui-se que valores de  $H_{so} > 2.8$  m permitiriam a formação de um perfil de barra. Este valor é muito próximo do valor limite apontado por Teixeira (1994), que refere a existência de condições de erosão para agitação com altura superior a 3 m.

De acordo com a figura 8.14. (coeficiente  $P$ ) é também possível separar a transição barra/berma através de um único parâmetro, utilizando-se para tal o parâmetro representados nas abcissas ( $gH_{so}^2$ ) como parâmetro determinante. Valores de  $gH_{so}^2$  entre 60 e 90 permitem obter uma separação tão efectiva como o valor de  $P$  entre 15000 e 16000, para os dados obtidos, correspondendo a valores de  $H_{so}$  entre 2.5 m e 3.0 m, semelhantes aos do intervalo obtido utilizando o parâmetro  $c$ . Assim, por concordância entre os vários métodos, parece curial concluir que, para a área em questão, e para condições de agitação ao largo superiores a 2.5/3.0 m existirá, genericamente, erosão da face da praia e tendência de formação de perfil de barra. Esta conclusão é apenas aplicável à área de estudo e a um comportamento genérico do sector costeiro, não podendo ser extrapolável para outras situações na costa oeste portuguesa, nem aplicada a casos específicos.

#### 8.4.4. Comparação mesoescala-macroescala e limites propostos

Na comparação entre os dois tipos de escalas analisadas (mensal/sazonal *versus* diária), verifica-se que a aplicação dos mesmos critérios pode conduzir a resultados desajustados. A aplicação do critério de variação volumétrica, que possibilitou a obtenção de resultados satisfatórios à macroescala, permitindo verificar o melhor ou pior ajuste dos vários métodos existentes na literatura para separação do

comportamento barra/berma, não funcionou na comparação diária. Tal deve-se, possivelmente, à inexistência de tempo de resposta suficiente do perfil e à ocorrência de variações laterais acentuadas, à escala diária, enquanto que numa análise de macroescala o efeito temporal tende a atenuar estes problemas, minimizando a sua influência.

Recorrendo a critérios distintos, foi possível obter valores de melhor ajuste, para cada parâmetro testado, em cada tipo de escala temporal. Na tabela 8.8. estão expressos os valores limite para a separação de situações barra/berma, para os vários parâmetros propostos na literatura, bem como os valores obtidos para as análises de meso e macroescala.

Na coluna "Variação" expressam-se as variações percentuais mínima e máxima dos valores limite propostos para a área de estudo, relativamente aos valores limite referidos por vários autores, na literatura. Quando os valores de campo foram superiores aos da literatura, a variação possui sinal "+" e se inferiores utiliza-se o sinal "-".

Tabela 8.8. Limites de comportamento barra/berma, propostos na literatura e calculados à meso e macroescala para a área em questão.

Parâmetros	Literatura	Mesoescala	Macroescala	Variação (%)
K	5.5	5.5 - 6.0	5.9 - 6.1	0 / +11
K'	115	130 - 150	133 - 136	+ 13 / +30
M	0.0007	≈ 0.001	0.0011 - 0.0015	+43 / +114
c	2	1.75 - 1.95	1.86 - 1.90	-5 / -13
P	22900	15000 - 16000	13850 - 14560	-30 / -40
A	17	≈ 15	18.4 - 18.9	-12 / +11
N	10	9 - 10	5 - 8	-50 / 0

Pela análise da tabela 8.8. recomenda-se a utilização dos parâmetros K e c, com valores limites situados, respectivamente, entre  $5.6 < K < 6.1$  e  $1.75 < c < 1.9$ , devido às menores variações percentuais registadas face aos valores propostos na literatura e à relativa constância dos valores obtidos nas análises efectuadas. Pode considerar-se que para situações em que o valor cai dentro dos intervalos expressos, as praias estão em situações de transição barra/berma, mas sem definição concreta da tendência evolutiva. Valores de  $K < 5.6$  ou de  $c < 1.75$  indicam claramente situação de transição para perfil de berma, enquanto que valores de  $K > 6.1$  ou  $c > 1.9$  significam formação de perfil de barra, para a área de estudo.

## 8.5. ALTURA DA BERMA

### 8.5.1. Introdução e conceitos teóricos

A berma da praia é uma forma deposicional da praia emersa, com pequena inclinação, formada pela deposição de sedimentos transportados para a praia em condições de agitação menos energéticas (Komar, 1976). Durante tempestades, as ondas promovem a erosão da berma, tendendo à sua destruição. No entanto, nesses períodos de agitação mais energética pode, paradoxalmente, formar-se uma berma mais elevada, devido à maior altura das ondas (Bascom, 1954 *in* Komar, 1976). Na realidade, o espraio das ondas de tempestade adiciona areia ao topo da berma, ao mesmo tempo que a face da praia é erodida e a extensão da berma reduzida. Assim, uma tempestade pode deixar uma berma alta e estreita, que sobreviverá até que a erosão subaérea ou a acção de uma tempestade maior a remova (Komar, 1976).

A existência de diferentes condições de agitação, responsáveis por erosão e posterior formação de bermas, pode levar à ocorrência de várias bermas na mesma praia, em simultâneo. Na área de estudo, verifica-se com alguma frequência a presença de duas bermas em algumas praias, nomeadamente em Canto do Marco, Palheiros da Tocha e Vagueira Entre Esporões. Pelo contrário, em praias localizadas a sul de esporões, predomina a existência de apenas uma berma, frequentemente mal desenvolvida. Durante as campanhas Tocha 92 e Areão 95 esteve sempre presente uma berma bem desenvolvida, em ambas as praias, tendo ocorrido a formação de uma segunda berma em Tocha 92, entre os dias 13 e 15 de Dezembro de 1992.

A investigação relativa à formação de bermas e à determinação da sua altura iniciou-se há já algumas décadas, tendo Bagnold (1940 *in* Komar, 1976) efectuado experiências em tanque de ondas, concluindo que a elevação da berma ( $B_b$ ) depende directamente da altura da onda ( $H$ ), segundo a relação directa:

$$B_b = bH \quad (8.1)$$

onde o valor de  $b$  é dependente da média granulométrica do sedimento ( $M_z$ ), tomando o valor 1.8 para  $M_z = 0.5$  mm. De acordo com o autor, o valor de  $b$  torna-se menor

para diâmetros médios superiores, visto que a percolação aumenta, diminuindo o valor de  $B_h$ , para as mesmas condições de agitação. A correspondência entre a altura da onda e a altura da berma foi igualmente verificada por Bascom (1954 *in* Komar, 1976) para praias arenosas, por Kemp (1963) em praias de cascalho e por King (1972 *in* Sunamura, 1989) em estudos laboratoriais. No entanto, a relação entre o tamanho do grão e a altura da berma não foi verificada por outros autores, tais como Kemp (1963) ou Sunamura (1975 *in* Sunamura, 1989). Este último sugere, inclusivamente, que o efeito do tamanho do grão na cota da berma é pouco significativo. Posteriormente, o mesmo autor (Sunamura, 1989) refere que a formação de bermas é controlada pelo tamanho do grão, mas não a altura por estas atingida.

Bagnold (1940 *in* Komar, 1976) e Savage (1959 *in* Sunamura, 1989) verificaram, ainda, que a elevação da berma e os processos de “runup” estão directamente ligados, referindo o primeiro autor que a cota da berma é coincidente com a altura do “runup”.

Bascom (1954 *in* Komar, 1976) e Strahler (1966 *in* Komar, 1976) mencionaram a relação entre os níveis de máxima elevação da berma e a maré, sugerindo que a elevação da berma é maior para alturas de maré superiores.

Tendo por base a relação de Hunt (1959), que descreve o “runup” ( $R$ ) em pendor uniforme rígido:

$$R/H_o = A(H_o/L_o)^{-0.5} \quad (8.2)$$

sendo  $H_o$  e  $L_o$  a altura e o comprimento de onda ao largo, respectivamente, e  $A$  uma constante adimensional empírica, Takeda e Sunamura (1982 *in* Sunamura, 1989) determinaram a relação:

$$B_h = A' H_b^{5/8} (gT^2)^{3/8} \quad (8.3)$$

onde  $B_h$  é a elevação da berma acima do nível da água,  $H_b$  é a altura na rebentação,  $T$  o período da onda,  $g$  a aceleração gravítica e  $A'$  um coeficiente que incorpora  $A$ . Utilizando dados laboratoriais, os autores determinaram que  $A' = 0.125$  e testaram a aplicação da fórmula a dados de campo obtidos em praias japonesas com amplitude de maré média de 1 m. Concluíram da aplicabilidade da fórmula aos dados de campo, com

a utilização do mesmo valor de  $A'$ , desde que a elevação da berma seja relativa ao nível médio do mar e se utilizem os valores médios de  $H_b$  e de  $T$ . A dispersão de dados verificada nesse trabalho foi atribuída a efeitos de maré e a variações temporais nas propriedades das ondas.

Em Portugal, Teixeira (1990) aplicou a equação 8.3 a valores de altura da berma das praias do Arco da Caparica, obtendo uma correlação satisfatória entre os valores observados e previstos, ainda que os resultados de campo evidenciassem uma tendência para alturas de berma superiores. O autor atribui tal facto a oscilações dos níveis de maré resultantes de variações nas condições atmosféricas ou à existência de ondas singulares extraordinariamente altas que deixam a sua marca de espraiamento a cotas superiores às deixadas pelo espectro normal das ondas.

#### 8.5.2. Resultados

Tendo por base os perfis diários obtidos nas campanhas Tocha 92 e Areão 95, determinou-se a cota do topo da berma, em cada perfil, estando os valores expressos na tabela 8.4.. No entanto, nem todos os valores obtidos poderão ser utilizados num estudo conducente à determinação empírica da elevação da berma, visto que a máxima cota da berma poderá não estar de acordo com as condições de maré e agitação vigentes em cada dia. Assim, procedeu-se a uma escolha dos dias elegíveis para tal estudo, tendo como critério o galgamento efectivo da berma, em todos os perfis realizados, dia a dia. Esta escolha teve por base as anotações de campo relativas ao galgamento da berma e aos níveis máximos de maré atingidos em cada dia, para cada perfil. Pressupõe-se, desta forma, que nos dias em que a berma foi galgada esta se encontraria efectivamente em construção (ou erosão) e que a sua cota máxima reflecte as condições daquele dia. Tal pressuposto não é absolutamente correcto, nomeadamente para alguns dias da campanha Tocha 92, onde a cota da berma se manteve sempre elevada, fruto de condições de agitação anteriores, ainda que pontualmente moldada pela agitação do dia de análise.

Como referido, entre os dias 13 e 15 de Dezembro de 1992 verificou-se a criação de uma segunda berma, a meio da face da praia anterior, tendo-se utilizado a cota da crista desta nova berma como representativa das condições nesse período. No final da campanha, o temporal de 16 de Dezembro promoveu a erosão das bermas

nova e antiga, transferindo a crista da berma para uma posição mais recuada e mais elevada relativamente ao dia anterior (figura 8.15.).

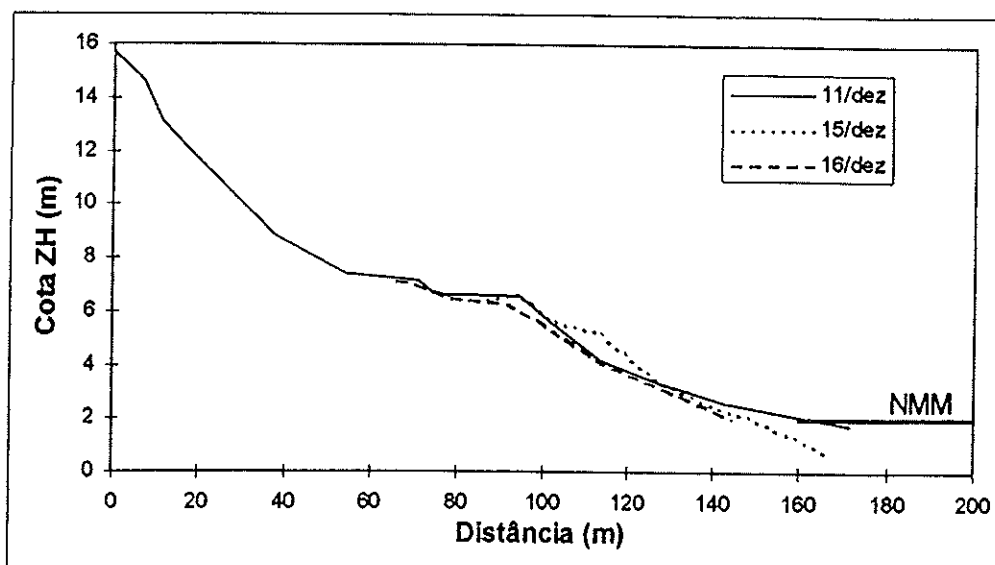


Figura 8.15. Variação do perfil de praia e da cota da berma entre os dias 11, 15 e 16 de Dezembro de 1992, no perfil Tocha 50S.

Em Areão 95 a berma foi galgada em todas as marés altas, verificando-se a existência de um canal de escoamento da água transportada pelo espraio, podendo-se assumir que se esteve sempre na presença de condições de formação ou de rearranjo da berma preexistente.

Relativamente às condições de agitação associadas à construção de bermas, utilizaram-se as estimativas visuais de ondas na rebentação, bem como os dados obtidos pelas bóias-ondógrafo, ao largo. Neste caso, visto existirem duas marés altas entre cada dois levantamentos topográficos, escolheram-se como representativos os dados onde a combinação entre o nível de maré e as condições de agitação permitiriam a obtenção de uma maior elevação teórica da berma, isto é, um nível mais elevado atingido pela onda. As condições de agitação e os parâmetros morfológicos utilizados para aplicação das diferentes formulações de previsão de elevação da berma estão expressos na tabela 8.9.. Conjuntamente, apresentam-se as alturas médias do topo da berma, para cada dia, referidas ao Zero Hidrográfico e calculadas pela média aritmética dos valores relativos às cristas de todos os perfis realizados. Nos dias 10 e 11 de Abril de 1995 só se obtiveram 1 e 2 perfis, respectivamente, sendo o valor médio da berma superior em cerca de 40 cm aos valores dos dias seguintes, sobretudo por não inclusão do perfil Sul, que possuía cotas de berma inferiores. Por esta razão, não se englobaram os referidos dias nesta análise.

Tabela 8.9. Valores de agitação, maré e morfologia utilizados na determinação da altura prevista da berma e valores observados da cota média do topo da berma ( $B_h$  real).  $M$  = Nível de maré actuante;  $H_{s0}$  = Altura significativa da onda ao largo;  $H_{b1}$  = Altura da onda na primeira linha de rebentação, estimada visualmente;  $H_{b3}$  = Altura da onda na terceira linha de rebentação, estimada visualmente;  $T_{po}$  = Período de pico, ao largo;  $\tan\beta$  = Declive da face da praia.

Dia	$M$ (m)	$H_{s0}$ (m)	$H_{b1}$ (m)	$H_{b3}$ (m)	$T_{po}$ (s)	$\tan\beta$	$B_h$ real (m)
<b>Tocha 92</b>							
1/dez	3.00	3.95	4.5	0.85	15.0	0.09	6.90
2/dez	2.97	4.69	5.0	0.6	15.0	0.09	6.82
3/dez	2.85	5.04	4.75	0.8	14.0	0.08	6.94
8/dez	3.20	5.71	5.0	1.0	14.0	0.07	6.90
13/dez	3.36	1.43	1.7	0.9	11.8	0.08	5.06
14/dez	3.60	1.45	1.5	0.55	12.5	0.09	5.05
15/dez	3.54	1.57	1.6	0.8	12.5	0.09	5.22
16/dez	3.48	6.79	6.5	0.9	12.9	0.07	6.71
<b>Areão 95</b>							
12/abr	2.99	1.26	1.12	*	11.8	0.11	5.45
13/abr	3.20	1.90	1.37	*	13.3	0.11	5.51
14/abr	3.39	1.53	0.90	*	12.5	0.11	5.60
15/abr	3.54	1.10	0.72	*	11.8	0.11	5.56
16/abr	3.62	1.03	0.58	*	10.5	0.11	5.68
17/abr	3.65	1.17	0.86	*	11.1	0.11	5.74

\* Apenas ocorreu uma linha de rebentação, em maré alta, directamente sobre a face da praia.

### 8.5.3. Discussão

Utilizando os dados expressos na tabela 8.9., procedeu-se à determinação da relação entre a altura da berma e os parâmetros que a influenciam, de acordo com os principais trabalhos citados.

A figura 8.16. mostra uma aproximação simples, semelhante à proposta por Bagnold (1940 *in* Komar, 1976), entre a altura da berma ( $B_h$ ) e a agitação incidente ( $H_{s0}$ ), tendo-se obtido uma relação entre estes parâmetros expressa por:

$$B_h = 1.55H_{s0} \quad (8.4)$$

Ainda que o valor empírico obtido, através do método dos mínimos quadrados, seja próximo do proposto por Bagnold para praias com diâmetro médio de 0.5 mm ( $b = 1.8$ ), não parece, pela análise da figura 8.16., que este tipo de aproximação seja representativo dos dados adquiridos, com excepção feita a alguns valores relativos a alturas de onda mais elevadas. Assim, a associação linear entre a altura da berma e a

altura da onda incidente não se afigura uma forma correcta de previsão, conduzindo a elevadas imprecisões.

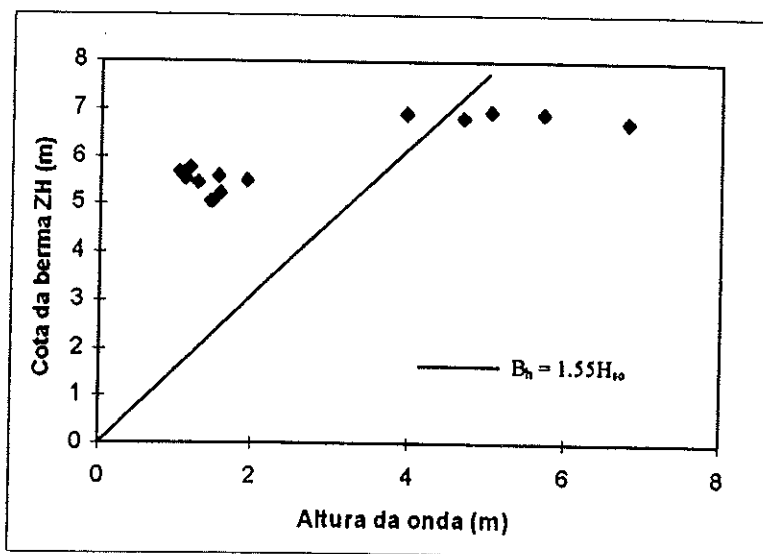


Figura 8.16. Relação entre a cota da berma observada e a altura da onda incidente, ao largo.

Efectuou-se, igualmente, o teste à equação 8.3, proposta por Takeda e Sunamura (1982 *in* Sunamura, 1989), que pressupõe a utilização de valores médios de período e de altura da onda na rebentação, correspondendo o nível assim determinado à elevação acima do nível médio do mar, de acordo com Sunamura (1989). No entanto, as variações de maré das praias microtidais japonesas, onde se obtiveram os dados de campo, foram obrigatoriamente menores do que as sentidas no sector Aveiro - Cabo Mondego, onde os valores de maré alta atingem níveis superiores, pelo que será de supor a necessidade de um ajuste do método às condições mesotidais.

A comparação entre as cotas da crista da berma previstas pela equação 8.3, tal como definida pelos autores, e as cotas da crista da berma observadas no campo é apresentada na figura 8.17.. Observa-se um desajuste notório entre os valores previstos e os observados, sendo os de campo superiores aos previstos, o que resulta de dois factores principais:

i) a altura da agitação na rebentação sobre a face da praia, em qualquer das campanhas, foi geralmente inferior ou próxima de 1 m, existindo dificuldades no seu relacionamento directo com as variações que ocorrem na face da praia;

ii) o nível de maré acima do qual o espraio da onda actuou oscilou entre 2.65 m ZH e 3.65 m ZH, pelo que a elevação da berma prevista deverá ser contabilizada acima destes valores e não relativamente ao nível médio do mar, pouco significativo em

termos de formação efectiva da berma, para praias meso e macrotidais.

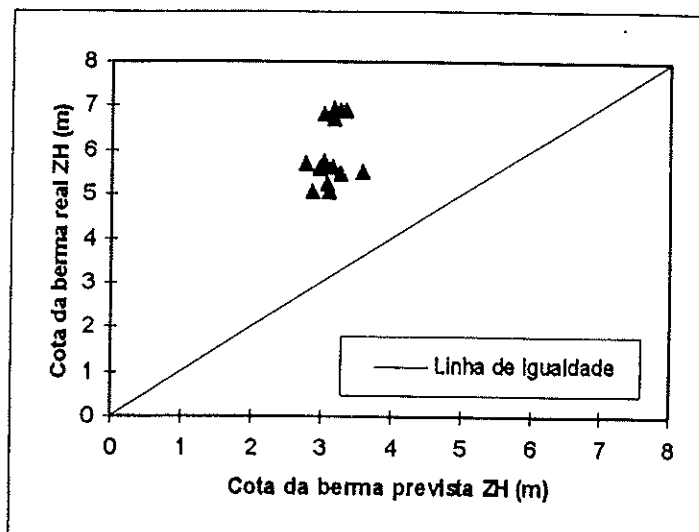


Figura 8.17. Comparação entre cotas da crista da berma previstas e observadas, utilizando a formulação de Takeda e Sunamura, sem alterações.

Tendo em atenção os dois factores referidos, foram introduzidas alterações na aplicação da equação 8.3, por forma a que esta possibilitasse um melhor ajuste. Assim, ao valor de  $B_h$  obtido somou-se não apenas 2 m ZH (nível médio do mar), mas o nível de maré alta que promoveu a formação mais elevada da berma ( $M$ ). Por outro lado, verificou-se que o recurso a  $T_p$  (período de pico) permite obter uma melhor aproximação entre valores previstos e valores reais, relativamente à utilização do período médio. No que respeita à utilização da altura da onda, testou-se a utilização dos valores de  $\bar{H}_o$  (altura média da onda incidente, ao largo,  $\bar{H}_o = 0.625H_{so}$ ) e de  $\bar{H}_{b1}$  (altura média da onda na primeira linha de rebentação), verificando-se que a altura média ao largo proporciona um ajuste ligeiramente melhor do que o recurso à altura na primeira linha de rebentação.

Com base nos testes efectuados, elaborou-se a figura 8.18., onde está definida a linha de igualdade entre os valores reais e previstos, verificando-se um bom ajuste geral entre dados, representado pela proximidade dos pontos à linha de igualdade e obtendo-se um coeficiente de correlação entre séries de 0.87 ( $n = 14$ ;  $p < 0.01$ ). Após alterações, a equação 8.3 poderá ser rescrita, sob a forma:

$$B_h = A' \bar{H}_o^{5/8} (gT_p^2)^{3/8} \quad (8.5)$$

onde  $B_h$  é a elevação da berma acima do nível de maré, isto é, acima de  $M$ . Desta

forma, para calcular a cota da crista da berma, o valor de  $M$  tem de ser adicionado ao resultado obtido após aplicação da equação 8.5.

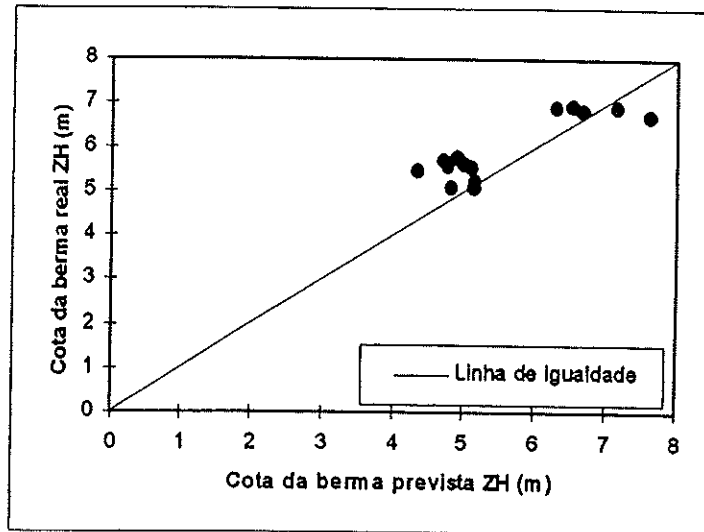


Figura 8.18. Comparação entre cotas da crista da berma previstas e observadas, utilizando a equação 8.5 (baseada na alteração da formulação 8.3).

Apesar do valor de  $A' = 0.125$  proposto por Takeda e Sunamura (1982 *in* Sunamura, 1989) não parecer desajustado relativamente aos dados obtidos, caso se utilize a expressão 8.5, verifica-se contudo que os valores observados no campo continuam a ser ligeiramente superiores aos previstos. Determinou-se, então, o melhor ajuste aos dados, utilizando o método dos mínimos quadrados, sendo este proporcionado por  $A' = 0.131$  (figura 8.19.).

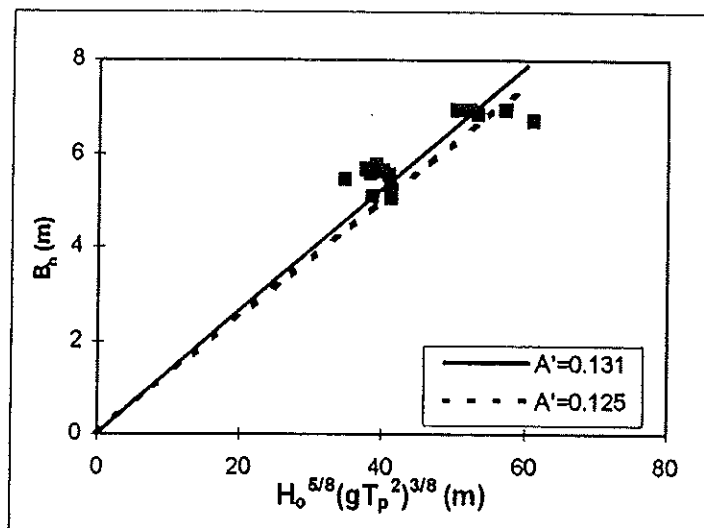


Figura 8.19. Comparação entre o valor de  $A'$  ( $A' = 0.125$ ) proposto por Takeda e Sunamura e o melhor ajuste obtido ( $A' = 0.131$ , a cheio).

As formulações atrás referidas e testadas (8.3 e 8.5) têm como parâmetros as condições de agitação incidente e baseiam-se numa equação desenvolvida para determinar níveis de “runup” em estruturas rígidas, de pendor uniforme. No entanto, o

“runup” é dependente do valor do declive da praia (*vide* capítulo 6), que poderá ser uma peça influente na determinação da elevação da berma.

As equações referidas não são dependentes das condições morfológicas, fornecendo valores de  $B_h$  iguais em praias dissipativas e reflectivas, para as mesmas condições de agitação, o que não deverá acontecer, na realidade. Com base neste pressuposto, testou-se a aplicação da formulação anteriormente utilizada na determinação do nível máximo de “runup” (equação 6.15), para previsão do nível de elevação da berma, acima do Zero Hidrográfico, assumindo que:

$$B_h = R_{\max} + M \quad (8.6)$$

ou seja, considerando a altura da crista da berma igual ao valor máximo do “runup” adicionado ao nível de maré actuante.

Na figura 8.20. pode observar-se o ajuste entre os dados de campo e os valores previstos desta forma, obtendo-se valores estimados ligeiramente inferiores aos reais, com excepção dos dias em que se assistiu à construção de uma nova berma (13 a 15 de Dezembro de 1992). Um melhor ajuste aos dados seria fornecido pela relação:

$$B_h = 1.1 (R_{\max} + M) \quad (8.7)$$

A diferença entre valores previstos e observados, ainda que pequena, poderá resultar de dois factores principais:

i) existência de berma desenvolvida e elevada desde o início das campanhas Tocha 92 e Areão 95, tendo permanecido como tal no decorrer das campanhas, podendo o seu topo resultar da acção de condições anteriores de maré e agitação. Isto é, apesar do espraio da onda promover o galgamento destas bermas, estaria apenas a moldar uma forma herdada;

ii) existência de níveis de sobrelevação, junto à praia, superiores aos valores de sobrelevação obtidos no marégrafo de Aveiro (inferiores a 30 cm, mesmo em situação de temporal), por influência da geometria da bacia no marégrafo e pelo abrigo portuário relativamente ao empilhamento da massa de água junto à costa. Desta forma, o valor de  $M$  utilizado poderá ter sido inferior ao valor real existente na praia.

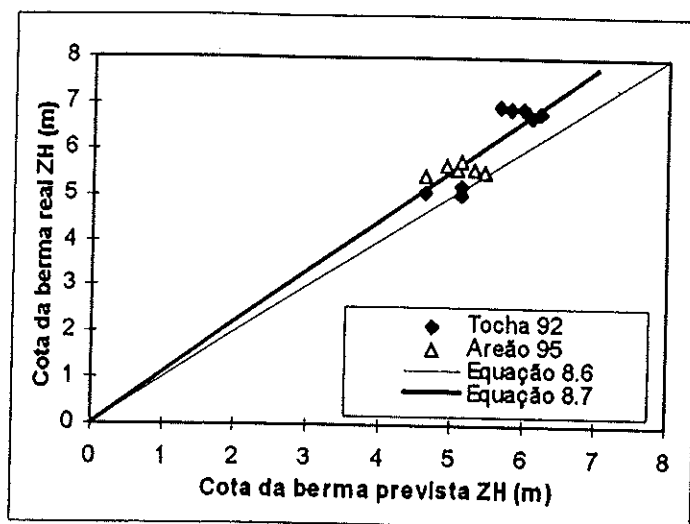


Figura 8.20. Comparação entre cotas da crista da berma previstas e observadas, utilizando as equações 8.6 e 8.7.

## 8.6. DECLIVE DA FACE DA PRAIA

### 8.6.1. Introdução e conceitos teóricos

A face da praia localiza-se na zona de transição entre a praia emersa e a praia submersa, correspondendo à área actuada pelo espraio da onda no decurso do ciclo de maré. Coincide, frequentemente, com a extensão de praia que se estende desde o nível mais baixo atingido pela maré até à crista da berma.

Para Komar (1976), o declive da face da praia é governado pela assimetria na intensidade do espraio e na resultante assimetria do transporte perpendicular à praia, derivado da menor intensidade da ressaca, por percolação de água no sedimento e pelo efeito de atrito por este induzido. Em praias com sedimentos grosseiros, onde a ressaca é muito reduzida por perda maciça de água devida à percolação gravítica, o pendor tenderá a ser maior (Inman e Bagnold, 1963; Komar, 1976). Esta relação, onde o aumento do pendor se encontra relacionado com o aumento do tamanho das partículas, foi demonstrada por vários estudos de campo e por experiências laboratoriais em tanques, referidas em Komar (1976) e em Sunamura (1984, 1989), autores que apresentam súmulas da investigação existente à data, sobre declive de praias. Os estudos sobre este tema ter-se-ão iniciado nos anos 30, ainda que apenas no final da década de 60, início dos anos 70, se tenham começado a apurar quais os principais factores responsáveis pelas variações do pendor de praia.

Na síntese elaborada por Komar (1976), o factor mais importante relativamente

ao declive da praia é o tamanho do grão, ocorrendo um incremento no pendor com o aumento da dimensão granulométrica. O nível de energia das ondas (directamente relacionável com a altura) é o segundo factor apontado, referindo o autor que para sedimentos granulometricamente iguais as maiores energias produzem pendores menores. Outros parâmetros apontados são a declividade da onda, a calibragem do sedimento, o nível freático na praia e o estado da maré.

No trabalho de Sunamura (1984) não existem grandes divergências relativamente ao exposto por Komar (1976), sendo referidos os seguintes factores:

- i) características do sedimento (tamanho do grão, calibragem e peso específico);
- ii) propriedades da onda (altura, declividade e período do espraio);
- iii) lençol freático da praia;
- iv) nível da maré;
- v) velocidade da corrente longilitoral.

Para Sunamura (1984), os factores cruciais são os dois primeiros, dos quais seleccionou o diâmetro do grão, a altura da onda e o comprimento de onda como os mais importantes.

Tal como para os estudos qualitativos, vários foram os autores que se esforçaram no sentido da quantificação das relações entre os factores atrás aludidos e o declive da face da praia, sendo parte dos resultados desses trabalhos apresentados em Komar (1976). Contudo, dada a actuação conjunta e simultânea dos vários mecanismos forçadores sobre a praia, verifica-se uma considerável variação no pendor da mesma, levando a uma elevada dificuldade na sua caracterização e previsão. Assim, Komar (1976) refere a previsão quantitativa do pendor da face da praia como sendo ainda remota, nos meados da década de 70. Posteriormente, Sunamura (1984) corroborou a mesma opinião.

Tendo por base os estudos efectuados por Bascom (1951 *in* Komar, 1976), para praias de elevada energia da costa do Pacífico dos EUA, e por Wiegel (1964 *in* Komar, 1976), para praias de baixa energia de New Jersey, Carolina do Norte e Florida, Komar (1976) define duas curvas de relação directa entre o diâmetro médio do grão e o pendor da face da praia, a meia-maré (ver figura 8.21.). Da análise do gráfico é visível uma tendência das praias com sedimentos mais grosseiros para apresentarem pendores mais elevados na face da praia. Por outro lado, é notório que,

para igual diâmetro, uma praia com maior energia média incidente possui menor pendor.

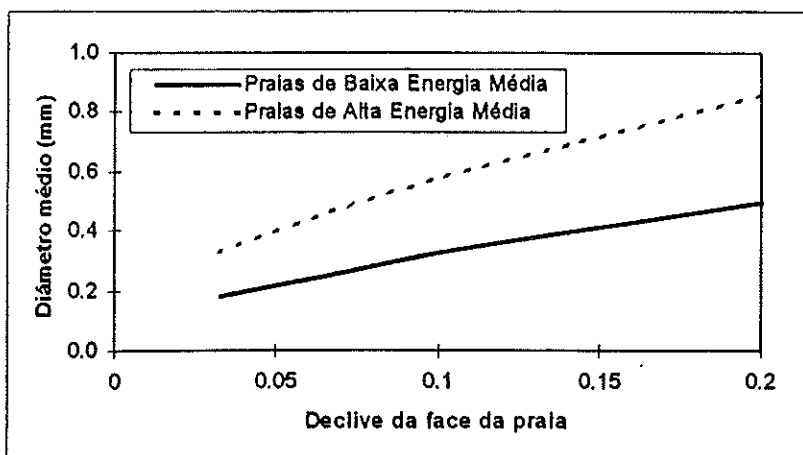


Figura 8.21. Relação directa entre declive da face da praia e diâmetro médio do grão, de acordo com Komar (1976).

Sunamura (1984) apresenta um estudo de maior detalhe sobre a previsão do declive da face da praia ( $\tan\beta$ ), tendo para tal seleccionado os factores por ele considerados como os principais condicionantes desse declive e recorrido à análise dimensional. Assim, utilizando  $H$  (altura da onda),  $T$  (período da onda) e  $M_z$  (diâmetro médio do sedimento), aos quais associou o efeito de gravidade (de que a percolação é dependente), o autor estabeleceu uma equação onde apenas traduz os factores de dependência:

$$\tan\beta = f(M_z, H, T, g) \quad (8.8)$$

Sabendo que o pendor aumenta de forma directamente proporcional ao tamanho do grão e inversamente à exposição à agitação ou à declividade da onda, o autor representou a equação 8.8 de forma adimensional na seguinte expressão:

$$\tan\beta = f(H_b/g^{0.5}M_z^{0.5}T) \quad (8.9)$$

Recorrendo a experiências em tanques de ondas, com areias quártzicas unimodais, o autor determinou a expressão:

$$\tan\beta = 0.013/(H_b/g^{0.5}M_z^{0.5}T)^2 + 0.15 \quad (8.10)$$

equivalente a:

$$\tan\beta = 0.26(M_z/H_o)(H_o/L_o)^{-0.6} + 0.15 \quad (8.11)$$

caso se considere  $L_o = 1.56T^2$  e a fórmula de Komar e Gaughan (1972) para conversão de  $H_o$  em  $H_b$ , como proposto e utilizado por Sunamura (1984). Para alguns dados de campo, de praias localizadas nas zonas costeiras britânica, japonesa e pacífica dos EUA, o autor teve igualmente de recorrer à conversão de Komar e Gaughan (1972), por não possuir valores na rebentação. A relação obtida para os dados de campo foi ligeiramente diferente, podendo ser expressa por:

$$\tan\beta = 0.12/(H_b/g^{0.5}M_z^{0.5}T)^{0.5} \quad (8.12)$$

ou pela equação:

$$\tan\beta = 0.25(M_z/H_o)^{0.25}(H_o/L_o)^{-0.15} \quad (8.13)$$

o que equivale, numa forma mais simplificada, à relação:

$$\tan\beta = 0.25(M_z^{0.25}L_o^{0.15}/H_o^{0.4}) \quad (8.14)$$

De uma forma geral, a equação 8.12 tem sido a mais utilizada na literatura, ainda que alguns autores não tenham encontrado relação directa entre  $\tan\beta$  e o parâmetro adimensional de Sunamura (ex.: Boon e Green, 1988; para praias das Caraíbas). Efectivamente, existe uma muito acentuada dispersão de valores de campo em torno da curva estabelecida, ainda que seja relativamente evidente a tendência de decréscimo do declive com o aumento do parâmetro adimensional. Para Sunamura (1984), a dispersão de dados deve-se, em primeiro lugar, ao campo (praia) constituir um sistema físico muito mais complexo do que o laboratório, ocorrendo:

- a) variações temporais e espaciais de  $M_z$ ;
- b) variações temporais dos parâmetros de ondulação;

- c) presença de forma rítmicas, tais como “beach cusps” e “giant cusps”;
- d) erros e falta de precisão na medição do declive da face da praia.

Outros factores apontados pelo autor como responsáveis pela dispersão dos valores são a calibragem do sedimento, o tempo de resposta dinâmica do pendur à actuação das ondas e os efeitos de maré, não tendo sido incorporados nos estudos por ele efectuados. Comparando expressões obtidas em laboratório e no campo, verifica-se que os valores do declive em praias laboratoriais são sempre superiores aos de praias naturais, para o mesmo valor adimensional, facto para o qual Sunamura (1984, 1989) não encontra explicação.

Em Portugal, foram vários os autores (Andrade, 1990; Teixeira, 1990; Pinto, 1993 e Tomás, 1995) que relacionaram o declive da face da praia com a granulometria do sedimento. No entanto, raramente foi contemplada a inclusão dos parâmetros de agitação, pelo que, na generalidade, se recorreu ao gráfico de Komar (1976), onde a relação entre  $M_z$  e  $\tan\beta$  serve para diferenciar ambientes energéticos distintos.

Para a área de estudo desta dissertação Pinto (1993) e Tomás (1995) utilizaram as curvas propostas por Komar (1976), chegando a conclusões opostas. Pinto (1993) concluiu que as praias entre Vagueira e Praia de Mira são praias de alta energia, caracterizadas por uma variabilidade geográfica (longilitoral) muito grande no diâmetro médio dos sedimentos, enquanto que o declive da praia se mantém pouco variável. O autor atribuiu a variabilidade geográfica do diâmetro médio do sedimento à existência de topografia rítmica na face da praia. Pelo contrário, Tomás (1995), para as praias entre Espinho e o Cabo Mondego, refere que todos os pontos obtidos no gráfico se posicionam de forma intermédia relativamente às curvas de Komar, sendo as praias de média energia, ainda que com acentuada dispersão. Para o autor, essa dispersão não é dominada por variações granulométricas mas pela oscilação no valor do declive da face da praia ( $\tan\beta$  apresenta valor médio de 0.10 e desvio padrão de 0.05 para os perfis utilizados pelo autor), sugerindo que se encontram diferentes situações de agitação actuando no mesmo conteúdo sedimentar, pouco variável ao longo do tempo.

#### 8.6.2. Aplicação à área de estudo

A utilização das curvas de Komar (1976) ou da solução de Sunamura (1984)

pode possibilitar a obtenção de resultados de difícil interpretação. Tal é evidente na comparação das conclusões a que chegaram Pinto (1993) e Tomás (1995), para praias que possuem regime de agitação idêntico e comportamento sedimentológico semelhante.

Uma análise simples à aproximação de Komar (1976) permite verificar que as curvas apresentadas pelo autor se destinam a aproximações médias, de macroescala, pelo que não deverão ser utilizadas para variações diárias. Desta forma, esta solução não será utilizada de momento, voltando no entanto a ser referida adiante, quando se efectuar uma comparação de aproximações mesoescala - macroescala.

A solução de Sunamura (1984) foi testada para condições de variabilidade diária e destina-se a uma aplicação de mesoescala, pelo que se torna óbvia a existência de elevada dispersão de dados, visto existirem frequentes variações temporais e espaciais de todos os parâmetros intervenientes. A aplicação da formulação deste autor a variações de mesoescala, para a área de estudo, foi no entanto condicionada, tendo em vista a obtenção de uma menor dispersão possível dos dados. Para tal:

i) recorreu-se ao pendor médio de todos os perfis obtidos em cada dia usando, assim, um valor ponderado que minimiza a acção da morfologia rítmica da praia e restringe as variações longilitorais;

ii) utilizou-se sempre o valor do diâmetro médio da face da praia para a totalidade da área de estudo, de acordo com as observações deste e de outros estudos ( $M_z = 0.5$  mm), não contabilizando assim as variações longilitorais elevadas (Ferreira, 1993; Pinto, 1993; Teixeira, 1994; Tomás, 1995) e assumindo que a população sedimentar envolvida é genericamente a mesma e que não se altera significativamente ao longo do tempo, como parece estar demonstrado pela comparação entre as várias caracterizações efectuadas.

A totalidade dos dados utilizados na aplicação da formulação de Sunamura (1984) encontra-se expressa na tabela 8.10.

Utilizando os valores da altura da onda na rebentação, sobre a face da praia ( $H_{b3}$ ), não se observou qualquer relação directa entre a agitação e o comportamento morfológico da face da praia (figura 8.22.), não ocorrendo tendência expressa. É notório o desajuste da previsão de Sunamura (1984) aos dados em questão, o que seria esperado, visto que o autor utiliza valores de  $H_b$  observados ou estimados, para a primeira linha de rebentação.

Tabela 8.10. Dados de agitação, granulometria e declive da face da praia utilizados na aplicação da formulação de Sunamura (1984).

Dia	$H_{s0}$ (m)	$H_{b1}$ (m)	$H_{b3}$ (m)	$T_p$ (s)	$M_z$ (m)	$\tan\beta$
<b>Tocha 92</b>						
29/11	2.59	2.50	0.60	13.0	0.0005	0.08
30/11	2.21	3.00	0.65	13.0	0.0005	0.08
1/12	3.95	4.50	0.85	15.0	0.0005	0.09
2/12	4.69	5.00	0.60	15.0	0.0005	0.09
3/12	5.04	4.75	0.80	14.0	0.0005	0.08
5/12	4.72	4.00	0.80	13.0	0.0005	0.07
6/12	3.93	4.00	0.80	13.0	0.0005	0.07
8/12	5.71	5.00	1.00	14.0	0.0005	0.07
10/12	2.79	3.00	0.80	14.0	0.0005	0.06
11/12	3.50	3.75	0.95	14.5	0.0005	0.06
13/12	1.43	1.70	0.90	11.8	0.0005	0.08
14/12	1.45	1.50	0.55	12.5	0.0005	0.09
15/12	1.57	1.60	0.80	12.5	0.0005	0.09
16/12	6.79	6.50	0.90	12.9	0.0005	0.07
<b>Areão 95</b>						
12/4	1.26	1.12	*	11.8	0.0005	0.11
13/4	1.90	1.37	*	13.3	0.0005	0.11
14/4	1.53	0.90	*	12.5	0.0005	0.11
15/4	1.10	0.72	*	11.8	0.0005	0.11
16/4	1.03	0.58	*	10.5	0.0005	0.11
17/4	1.17	0.86	*	11.1	0.0005	0.11

\*  $H_{b3}$  idêntico a  $H_{b1}$  visto só existir uma rebentação, sobre a face da praia.

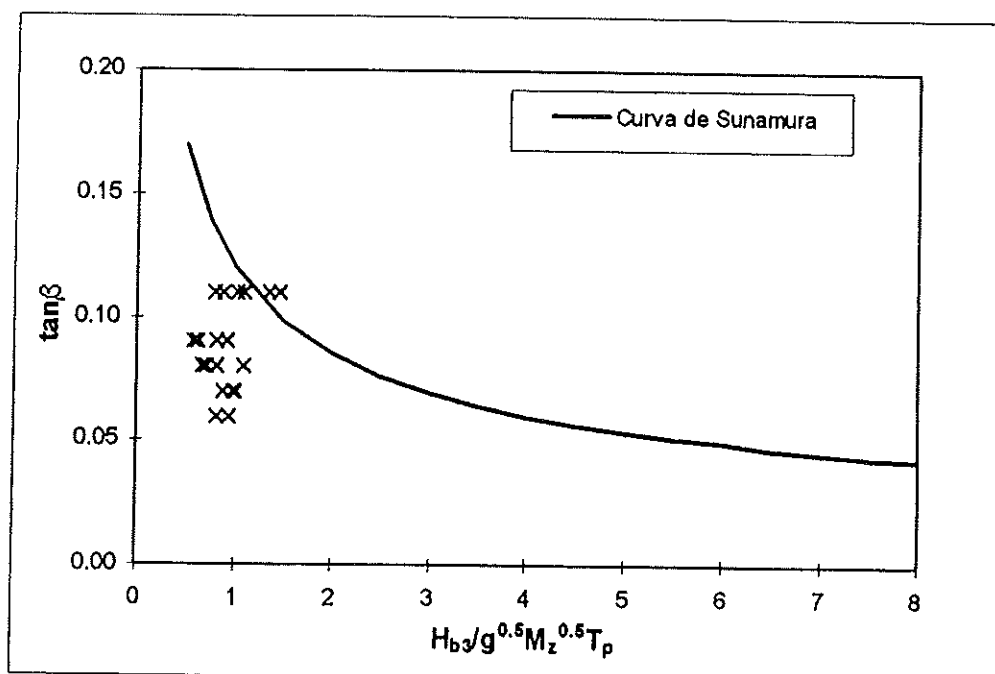


Figura 8.22. Relação entre o parâmetro adimensional e o declive da praia para condições de agitação na face da praia.

Recorrendo aos dados referentes à primeira linha de rebentação ( $H_{b1}$ ) a situação altera-se consideravelmente, sendo observável o aumento do pendor com a

diminuição do valor do parâmetro adimensional, em acordo com a proposta de Sunamura, sobretudo para os valores mais elevados de  $\tan\beta$  (figura 8.23.). No entanto, para declives menores ou iguais a 0.09 a dispersão de valores é muito acentuada, sem que a solução de Sunamura seja adequada para previsão. Para valores do parâmetro adimensional superiores a 3.5/4 (associados a condições de agitação mais energéticas) a previsão falha por uma margem elevada, sendo os resultados previstos bastante inferiores aos valores médios obtidos. Tal facto poder-se-á dever a dois factores:

i) efeito de amortecimento da energia das ondas pelas barras submersas, fazendo com que o declive da face da praia não tivesse sofrido uma diminuição tão grande quanto a esperada para as condições de energia elevada vigentes;

ii) provável inexistência de tempo de resposta suficiente do perfil relativamente à agitação, não chegando a adquirir o valor de declive correspondente, apesar de para ele tender.

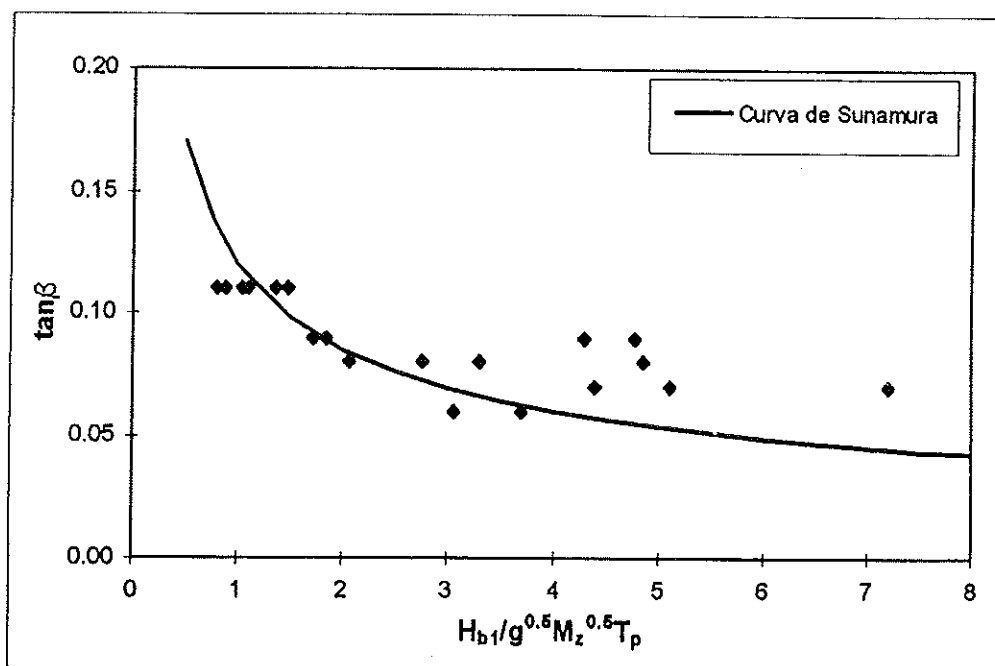


Figura 8.23. Relação entre o parâmetro adimensional e o declive da praia para condições de agitação na primeira linha de rebentação.

Tendo por base o parâmetro adimensional de Sunamura (1984), obteve-se uma curva mais ajustada aos dados das campanhas analisadas, daí resultando a equação:

$$\tan\beta = 0.106(H_{b1}/g^{0.5} M_z^{0.5} T_p)^{-0.25} \quad (8.15)$$

expressa na figura 8.24..

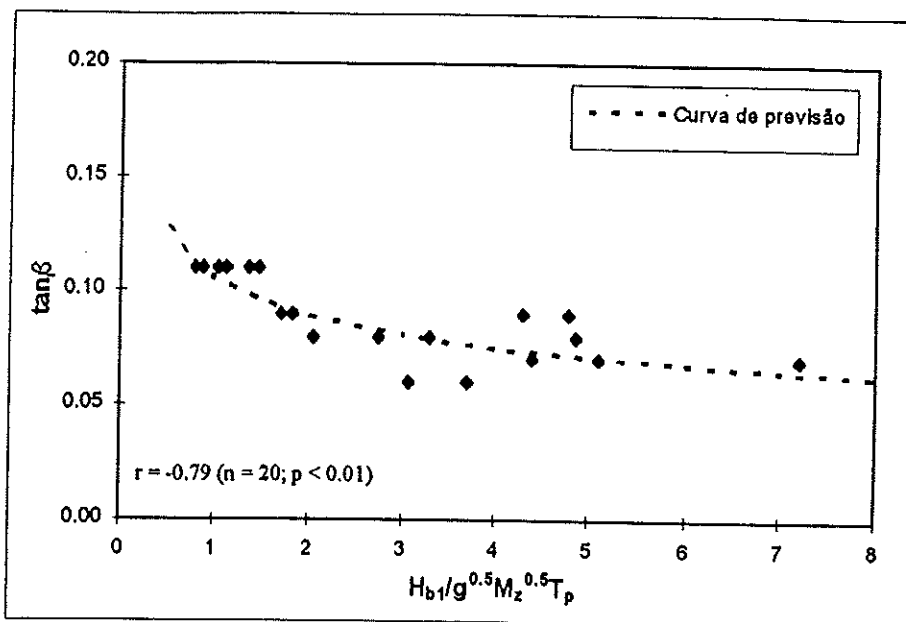


Figura 8.24. Melhor ajuste aos dados obtidos, para condições de agitação relativas à primeira linha de rebentação, utilizando o parâmetro adimensional de Sunamura.

Dada a dificuldade de aquisição de dados na primeira linha de rebentação, não só para a área de estudo como para a generalidade das praias, devido às necessidades técnicas envolvidas e ao esforço financeiro, torna-se importante a obtenção de uma formulação semelhante a 8.15 que permita a previsão do declive da praia utilizando a altura ao largo ( $H_{\infty}$ ) resultou na obtenção da equação :

$$\tan\beta = 0.112(H_{\infty}/g^{0.5} M_z^{0.5} T_p)^{-0.27} \quad (8.16)$$

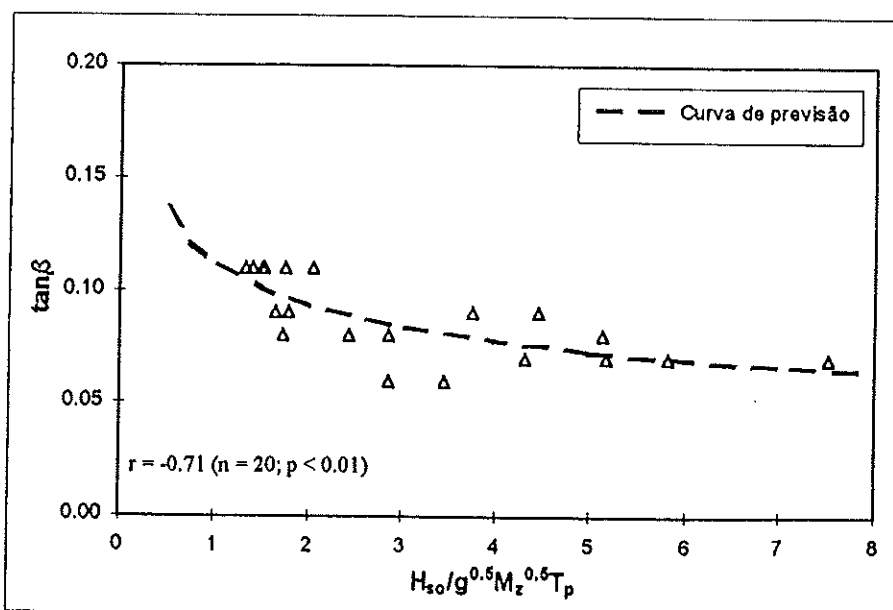


Figura 8.25. Melhor ajuste aos dados obtidos, para alturas de onda ao largo, utilizando o parâmetro adimensional de Sunamura.

Da análise das figuras 8.24. e 8.25., observa-se a maior aproximação da forma de previsão aos dados, nomeadamente para dados referentes a condições de agitação incidente com níveis energéticos mais elevados. Apesar das minimizações efectuadas relativamente ao declive da face da praia e à variabilidade granulométrica, continua a observar-se uma dispersão elevada dos dados que, provavelmente, não permitirá a obtenção de métodos de previsão extremamente rigorosos relativamente ao valor do pendor da face da praia.

### 8.6.3. Comparação mesoescala - macroescala

Como referido anteriormente, as curvas médias determinadas por Komar (1976) para previsão do declive em função do tamanho médio do grão destinam-se prioritariamente a uma utilização de macroescala, visto que se torna necessário desde logo saber se o comportamento *médio* da praia é de alta energia ou de baixa energia, classificação que só por si já é de macroescala. Por outro lado, não será possível com apenas alguns dados de declives e de granulometria tentar classificar as praias relativamente à sua energia média. Isto porque, caso o período de amostragem não tenha sido suficientemente grande e apenas coincidente com um determinado tipo de condições (ex.: Verão ou agitação pouco energética), se estará a classificar a praia para os dias analisados (mesoescala) e não para a totalidade do ano (comportamento médio - macroescala). Esta análise pode, em parte, justificar as incongruências encontradas, para a área de estudo, nos trabalhos de Pinto (1993) e Tomás (1995). Parece, assim, estar-se na presença de um caso onde a aplicação do conceito à mesoescala se poderá tornar erróneo, ainda que provavelmente ajustado à macroescala.

Usando a aproximação de Komar (1976) como apenas respeitante à macroescala e sabendo que a área de estudo corresponde a uma zona exposta, de elevada energia, com um diâmetro médio de 0.5 mm na face da praia, seria de esperar um declive médio da face da praia de 0.083 (1/12). Este valor está relativamente próximo da média dos levantamentos utilizados por Tomás (1995), com 0.10, e deste estudo, para as campanhas MOLICEIRO, com 0.09, o que confirma a possibilidade de utilização do método para condições de macroescala.

Para testar a viabilidade, à macroescala, das equações 8.15 e 8.16, obtidas neste estudo e baseadas na formulação inicial de Sunamura (1984), utilizaram-se os valores médios anuais de agitação ( $H_{so} = 2.2$  m;  $T_p = 11.3$  s), a média granulométrica da área em estudo ( $M_z = 0.5$  mm) e um valor de  $H_{sb} = 3.05$  m (determinado pela formulação de Komar e Gaughan, 1972). Obtiveram-se declives médios anuais de 0.076 (equação 8.15) e 0.085 (equação 8.16), relativamente próximos das observações (0.09 a 0.1). Estas formulações podem, então, ser consideradas como razoavelmente ajustadas, quer para variações diárias, quer para condições médias, na área de estudo, ainda que com algumas reservas, dada a grande dispersão de dados existente.

De uma forma genérica, pode referir-se que a aproximação de Komar (1976) deverá ser aplicável apenas a condições de macroescala, após definição do tipo de praia que se está a estudar, relativamente à energia média incidente. A formulação de Sunamura (1984) é aplicável, sobretudo, a condições de mesoescala, ainda que com alterações específicas por forma a se ajustar à área em estudo.

## 8.7. PROFUNDIDADE DE MISTURA

### 8.7.1. Introdução e conceitos teóricos

A profundidade de mistura do sedimento representa a espessura vertical de uma camada onde se processa a troca sedimentar activa e abaixo da qual não existe movimentação da areia (Sherman *et al.*, 1993). Esta camada é também aceite como correspondendo à espessura na qual ocorre transporte sedimentar (Sunamura e Kraus, 1985; Sherman *et al.*, 1993; Ciavola *et al.*, 1997a), pelo que a sua correcta determinação se reveste de importância fundamental para o cálculo do transporte longilitoral, particularmente quando se utilizam traçadores (Kraus, 1985; Ciavola *et al.*, 1997a). A determinação deste parâmetro é igualmente importante para a descrição dos sistemas de praia (Sherman *et al.*, 1993, 1994), para os projectos de realimentação artificial (Fucella e Dolan, 1996) e para a modelação de processos costeiros (Sherman *et al.*, 1993). Contudo, o conhecimento sobre a profundidade de mistura é, ainda, rudimentar, visto que existem poucas campanhas de campo especificamente planeadas para determinar a sua variabilidade espacial e temporal (Sherman *et al.*, 1994). Esta lacuna de conhecimento é ainda maior em praias com elevado declive, onde o número

de campanhas é extremamente reduzido (Ciavola *et al.*, 1997a).

Dependendo do tipo de dados utilizados, das praias analisadas e da metodologia empregue, várias relações empíricas foram determinadas, relacionando a altura significativa das ondas na rebentação ( $H_{bs}$ ) com a profundidade média de mistura observada ( $Z_m$ ). É possível encontrar, na literatura, relações variando de  $Z_m = 0.027H_{bs}$  (Kraus *et al.*, 1982; Kraus, 1985; Sunamura e Kraus, 1985) a  $Z_m = 0.4H_{bs}$  (Williams, 1971). Esta disparidade causa problemas de aplicação, visto que se podem calcular valores previstos com diferenças até 1500% entre si, dependendo da equação utilizada. Este problema já tinha sido identificado por vários autores (Williams, 1971; Gaughan, 1978; Jackson e Nordstrom, 1993; Sherman *et al.*, 1993, 1994; Ciavola *et al.*, 1997a) através da comparação dos seus resultados com formulações disponíveis na literatura.

Em parte, as variações existentes poderão ser explicadas pelo facto de todas as formulações publicadas até ao momento se basearem na altura da onda na rebentação, ignorando as características morfológicas e sedimentológicas das praias. Desta forma, nenhuma dessas equações poderá ter aplicação generalizada, estando a sua abrangência restrita a praias com condições similares àquelas para as quais foram estabelecidas.

Dentro das características morfológicas, o pendor da face da praia parece ser um parâmetro importante no controlo da profundidade de activação do sedimento, sendo frequentemente referido como factor fundamental para a correcta determinação da profundidade de mistura (Williams, 1971; Jackson e Nordstrom, 1993; Ciavola *et al.*, 1997a; Ferreira *et al.*, 1998). Pela comparação simples dos trabalhos realizados em praias com pendores elevados e em praias com declives suaves, os valores obtidos são cerca de uma ordem de grandeza superiores nas praias com declives mais abruptos do que nas praias de declive pouco acentuado, para condições de agitação semelhantes. Tendo por base este facto, Ciavola *et al.* (1997a) desenvolveram uma relação entre  $H_{bs}$  e a profundidade de mistura apenas para praias com declives superiores a 1/12.5. A relação obtida indica que a profundidade de mistura média ao longo de um perfil de praia é cerca de 27% da altura significativa na rebentação.

O objectivo principal deste sub-capítulo é desenvolver uma equação que possa ser utilizada quer em praias de declive acentuado, quer em praias de declive suave, integrando hidrodinamismo (altura da onda) e morfologia da praia (pendor da face da praia). Para tal, um novo conjunto de dados foi obtido, em campanhas realizadas no Algarve. Os valores e as formulações resultantes desta análise serão, ainda,

comparados com os escassos dados existentes para a área em estudo nesta dissertação (Aveiro - Cabo Mondego).

### 8.7.2. Métodos

Não existe nenhum método universalmente aceite para a determinação da profundidade de mistura da areia (Ciavola *et al.*, 1997a). Contudo, três tipos de métodos têm sido utilizados, em separado ou conjuntamente, em estudos anteriores. Estes são:

- buracos preenchidos até à superfície com material marcado (King, 1951; Komar e Inman, 1970; Williams, 1971; Ciavola *et al.*, 1997a; Ferreira *et al.*, 1998);
- utilização de estacas graduadas, com ou sem anilhas de marcação (Greenwood e Hale, 1980; Jackson e Nordstrom, 1993; Fucella e Dolan, 1996; Ferreira *et al.*, 1998);
- análise de distribuição de traçadores em profundidade (Gaughan, 1978; Inman *et al.*, 1980; Kraus *et al.*, 1982; Kraus, 1985; Sunamura e Kraus, 1985; Sherman *et al.*, 1993, 1994; Ciavola *et al.*, 1997a).

Para o último método, Kraus *et al.* (1982) propuseram a utilização de uma profundidade de corte quando se atingissem 80% do número total de grãos recuperados em cada testemunho, sendo tal profundidade aceite e utilizada por vários outros autores.

Neste estudo recorreu-se aos três métodos, dependendo da campanha em causa. Para as campanhas LUAR Culatra 93, LUAR Garrão 95 e LUAR Faro 96 determinou-se a profundidade de mistura com base na análise de traçadores, enquanto que nas experiências Quarteira 96 e Quarteira 97 se utilizaram buracos preenchidos em conjunto com estacas graduadas, sendo o método de determinação semelhante ao descrito em Fucella e Dolan (1996). Em LUAR Faro 97 conjugaram-se as técnicas anteriores, permitindo uma comparação de resultados entre técnicas.

Nas experiências em que se recorreu à determinação da profundidade de mistura por distribuição das areias marcadas em profundidade, efectuaram-se testemunhos verticais (com cerca de 30 cm a 40 cm de profundidade), tendo sido seccionados de 5 cm em 5 cm e contados os grãos marcados observados em cada

secção. Os grãos contados em cada sub-amostra foram ponderados pelo peso da sub-amostra, para se obter uma concentração normalizada. A profundidade de corte de 80% proposta por Kraus *et al.* (1982) foi utilizada para a determinação da profundidade de mistura em cada testemunho.

Nos casos em que se utilizaram, em conjunto, as estacas e os buracos preenchidos, efectuou-se a colocação de perfis de estacas referenciadas e posicionadas, com buracos preenchidos adjacentes. Na maré baixa da colocação do material procedeu-se à medição da distância entre o topo das estacas e o nível da superfície da praia. Os buracos adjacentes tinham cerca de 40 cm de profundidade e foram preenchidos com areia colorida, até à superfície. Na maré baixa seguinte, após actuação da rebentação e do espraiço, a distância do topo das estacas ao nível da praia foi novamente medida, sendo igualmente determinada a profundidade à qual a areia colorida apareceu em relação a esse nível. Quando os níveis de superfície eram idênticos (condições de equilíbrio), de maré para maré, ou quando se verificava acreção, a profundidade de mistura foi contabilizada como sendo igual à profundidade a que se observava o aparecimento da areia colorida. Em caso de erosão, essa profundidade foi somada à deslocação da superfície, medida na estaca. Estas aproximações são apenas válidas se não existirem eventos extremos de erosão ou de acreção. Quando tal ocorre, torna-se difícil a obtenção de um conjunto de dados facilmente interpretável.

### 8.7.3. Resultados

Todos os locais das campanhas efectuadas correspondem a praias expostas, localizadas junto ao sistema de ilhas barreira da Ria Formosa (figura 1.2.), estando sob influência de um regime de maré mesotidal, em ambiente de energia moderada. As experiências decorreram em condições de amplitude de maré variável, entre 1 m (marés mortas) e 3 m (marés vivas) e para situações de altura significativa de onda na rebentação entre 0.34 m e 0.85 m.

Apesar de várias das campanhas terem decorrido no Outono e no Inverno, não ocorreram tempestades nos períodos de estudo, pelo que não existe um conjunto de dados correspondente a situações de elevada energia. Quase todas as campanhas coincidiram com situações de ondulação proveniente de sudoeste, gerando transporte

para Este. Apenas na campanha LUAR Faro 96 se registou uma situação de "Levante" (sudeste), com deriva dirigida para Oeste. O tipo de rebentação dominante nas campanhas foi sempre do tipo mergulhante, existindo rebentação progressiva apenas durante a maré baixa. A rebentação mergulhante ocorreu directamente sobre a face da praia, sendo a zona de "surf" muito estreita ou ausente.

A média granulométrica das areias das praias estudadas variou entre 0.26 mm (LUAR Culatra 93 e LUAR Garrão 95) até quase 0.60 mm (LUAR Faro 97). O valor médio do pendor da face da praia, por campanha, variou entre 0.10 (LUAR Garrão 95 e Quarteira 97) até 0.14 (LUAR Faro 96, LUAR Faro 97), com valores máximos e mínimos, por perfil, de 0.17 e 0.07.

As profundidades de mistura foram analisadas por perfil e por campanha, determinando-se os valores médios ( $Z_m$ ) e os máximos absolutos ( $Z_{max}$ ). Os valores médios, por campanha, variaram entre 10 cm (Garrão 95) e os 22 cm (Faro 96), enquanto que os máximos oscilaram entre 12.5 cm (Garrão 95) e os 35 cm (Quarteira 97 e Faro 97).

Os valores observados de altura significativa da onda na rebentação, de pendor da face da praia e de profundidade de mistura, em cada campanha, são apresentados na tabela 8.11..

Tabela 8.11. Altura da onda, pendor da face da praia e profundidades de mistura médias e máximas para as campanhas analisadas.

Campanha (data)	$H_b$ (m)	$\tan\beta$	$Z_m$ (cm)	$Z_{max}$ (cm)
LUAR Culatra 93 (7/10/93 manhã)	0.37	0.11	10.6	15.0
LUAR Culatra 93 (7/10/93 tarde)	0.34	0.11	10.6	15.0
LUAR Culatra 93 (8/10/93)	0.37	0.11	10.6	15.0
LUAR Garrão 95 (16/5/95)	0.64	0.10	9.9	15.0
LUAR Garrão 95 (17/5/95)	0.49	0.10	10.3	20.0
LUAR Faro 96 (7/3/96)	0.80	0.14	22.0	25.0
Quarteira 96 (27/3/96)	0.49	0.11	10.7	19.0
Quarteira 97 (15/3/97)	0.60	0.10	16.0	28.5
Quarteira 97 (18/3/97)	0.81	0.10	15.3	34.7
Quarteira 97 (20/3/97)	0.61	0.12	14.4	32.0
LUAR Faro 97 (24/4/97)	0.85	0.14	17.2	34.6

#### 8.7.4. Discussão

Nos estudos anteriormente realizados, as relações empíricas determinadas relacionavam a profundidade média de mistura ( $Z_m$ ) com a altura da onda na

rebentação ( $H_b$ ), através de uma equação na forma:

$$Z_m = KH_b \quad (8.17)$$

com o valor empírico de  $K$  a variar entre 0.027 e 0.4, como referido. Utilizando apenas os dados obtidos no presente trabalho e uma correlação entre dados do tipo expresso em 8.17, obtém-se:

$$Z_m = 0.23H_{bs} \quad (8.18)$$

para a profundidade média de mistura (figura 8.26.), com  $r = 0.92$  ( $n = 11$ ;  $p < 0.01$ ), e

$$Z_{max} = 0.39H_{bs} \quad (8.19)$$

para a profundidade máxima de mistura (figura 8.27.), com  $r = 0.96$  ( $n = 11$ ;  $p < 0.01$ ). Comparando as equações 8.18 e 8.19, regista-se uma razão  $Z_{max}/Z_m$  de 1.7. As equações determinadas por ajuste aos dados experimentais obtidos são semelhantes às existentes na literatura, para praias com declive acentuado (Jackson e Nordstrom, 1993; Sherman *et al.*, 1994; Ciavola *et al.*, 1997a; Ferreira *et al.*, 1998). Contudo, os coeficientes empíricos determinados são cerca de 8 a 8.5 vezes superiores aos obtidos em praias de pendor suave.

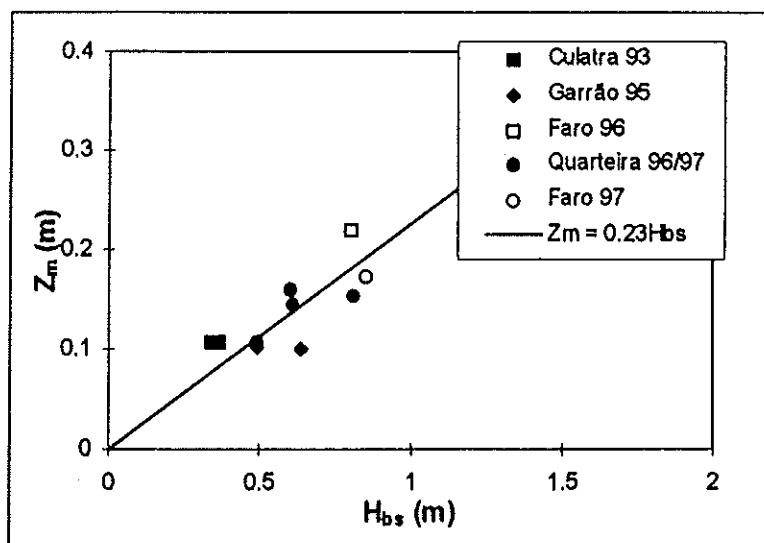


Figura 8.26. Relação entre  $Z_m$  e  $H_{bs}$  para os dados obtidos.

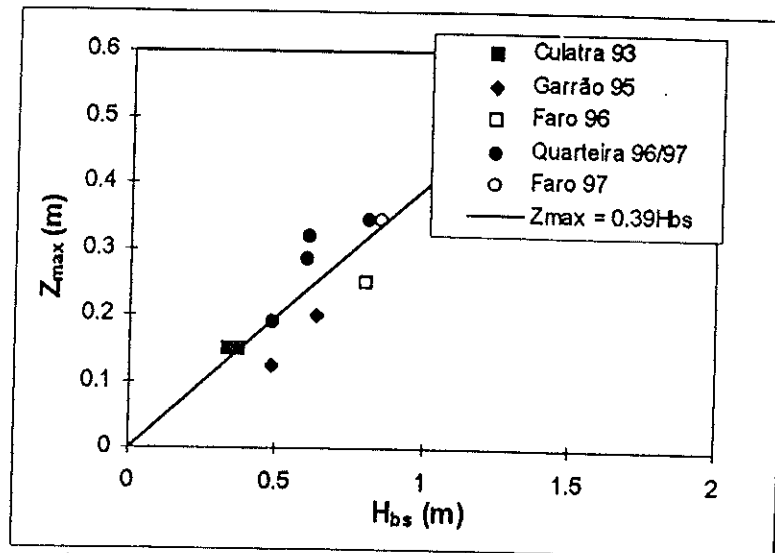


Figura 8.27. Relação entre  $Z_{max}$  e  $H_{bs}$  para os dados obtidos.

Na figura 8.28. compara-se a formulação 8.18 com a de Kraus *et al.* (1982), estando sobrepostas à totalidade dos dados recolhidos neste estudo e aos existentes na literatura com determinação de valores de profundidade média de remobilização (tabela 8.12.). Verifica-se que qualquer das equações se ajusta bem a conjuntos de dados diferentes, separados pelo declive da face da praia. Utilizou-se como valor arbitrário de separação  $\tan\beta = 0.08$ .

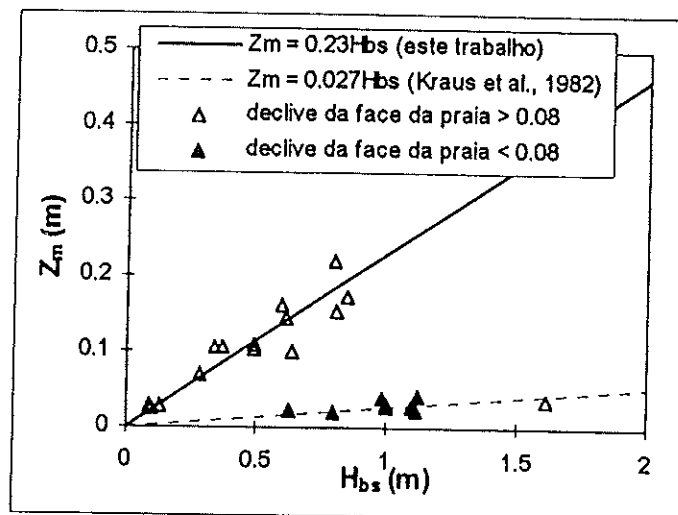


Figura 8.28. Comparação entre a formulação 8.18 e a equação de Kraus *et al.* (1982), sobrepostas aos dados existentes.

Tendo por base os dados das tabelas 8.11. e 8.12., foi possível determinar novas formulações, englobando as características das praias, através da introdução do pendur da face da praia nas equações 8.18 e 8.19. Nos casos em que é referido um intervalo de variação de agitação ou de pendur, utilizaram-se valores médios.

Tabela 8.12. Altura da onda, pendor da face da praia e profundidades de mistura médias e máximas para as campanhas descritas na literatura. a = valor não referido pelos autores.

Referência	Local	$H_{bs}$ (m)	$\tan\beta$	$Z_m$ (m)	$Z_{max}$ (m)
Komar e Inman (1970)	El Moreno*	0.28	0.14	0.07	a
Inman <i>et al.</i> (1980)	Torrey Pines**	1.12	0.04	0.043	0.09
Sunamura e Kraus (1985)	Ajigaura 78	0.98	0.014 - 0.02	0.038	a
	Ajigaura 79	1.10	0.014 - 0.02	0.029	a
	Shimokita	0.63	0.017 - 0.025	0.023	a
	Hirono - 1	1.61	0.1	0.037	a
	Hirono - 2	1.0	0.1	0.030	a
	Oarai 80	1.0	0.014 - 0.02	0.028	a
	Oarai 81	1.11	0.014 - 0.02	0.023	a
	Oarai 82	0.80	0.025 - 0.033	0.019	a
Jackson e Nordstrom (1993)	Delaware Bay	0.06 - 0.52	0.105	a	0.26
Sherman <i>et al.</i> (1994)	Fire Island	0.1	0.14	0.025	0.048
	Fire Island	0.09	0.14	0.028	0.066
	Fire Island	0.13	0.14	0.027	0.058

\* Média de 8 observações pontuais, com  $H_{bs}$  a variar entre 0.2 m e 0.4 m.

\*\* Valores obtidos pela análise de máxima penetração do traçador (figura 2 de Inman *et al.*, 1980).

As figuras 8.29. e 8.30. evidenciam as relações obtidas, que são expressas por:

$$Z_m = 1.86H_{bs}\tan\beta \quad r = 0.96 \quad (n = 24; p < 0.01) \quad (8.20)$$

$$Z_{max} = 3.33H_{bs}\tan\beta \quad r = 0.94 \quad (n = 16; p < 0.01) \quad (8.21)$$

A razão  $Z_{max}/Z_m$  observada para estas novas equações é de 1.8, semelhante à anterior. Na obtenção da equação 8.20 não foram tidos em conta os dados de Hirono (Kraus *et al.*, 1982) por serem os únicos notoriamente desajustados ao comportamento global registado. Tal pode resultar da existência de seixos e de burgaus nesta praia japonesa, microtidal, que poderão ter constituído uma protecção relativamente às fracções arenosas, não permitindo maior remobilização (Ciavola *et al.*, 1997a).

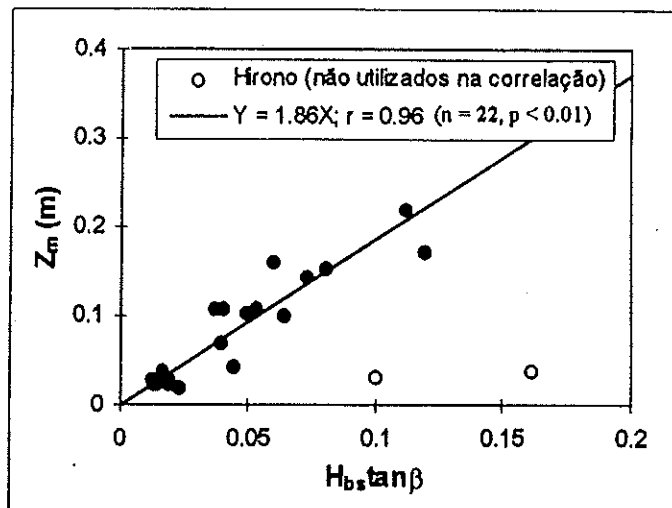


Figura 8.29. Relação entre  $Z_m$  e  $H_{bs}\tan\beta$  para os dados das tabelas 8.11. e 8.12..

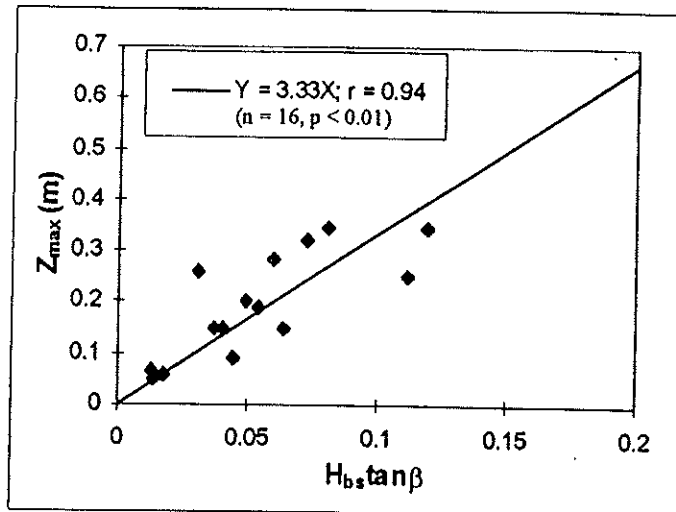


Figura 8.30. Relação entre  $Z_{max}$  e  $H_{b,tan\beta}$  para os dados das tabelas 8.11. e 8.12..

#### 8.7.5. Aplicação ao sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego

A lacuna de dados sobre remobilização para condições de elevada energia da onda faz com que a aplicação das formulações atrás obtidas para a área de estudo nesta dissertação possua algum grau de incerteza, visto que as condições energéticas elevadas são dominantes. O máximo valor de altura da onda na rebentação utilizado para o desenvolvimento das equações 8.20 e 8.21 foi de 1.12 m, cerca de metade do valor médio de agitação ao largo, na área de estudo. Assim, estas formulações não se encontram, ainda, validadas para praias de energia elevada, não se conhecendo na literatura qualquer experiência específica nesse sentido.

Existe, no entanto, uma campanha de campo com traçadores na área de estudo (campanha LUAR Mira - Tocha), descrita em Tabora (1993) e em Ciavola *et al.* (1997a), onde foram colocados dois buracos de controlo e um perfil de estacas graduadas, tendo sido possível calcular a profundidade de mistura para condições de energia elevada. Uma reavaliação dos dados dessa experiência permitiu obter uma profundidade de mistura média de 37.5 cm, para um máximo de activação medido de 53 cm. A estimativa visual da altura da onda na rebentação, efectuada por dois observadores, foi de cerca de 3 m, actuando sobre uma face da praia com um pendore de 0.08. Utilizando as equações 8.20 e 8.21, os valores esperados de  $Z_m$  e de  $Z_{max}$  são, respectivamente, 44.6 cm e 79.9 cm, correspondendo a uma sobrestima de 19% e de 51%.

O maior desajuste de  $Z_{max}$  pode ser explicado pela análise de dados relativos a

apenas um local, sendo possível a existência de níveis de remobilização superiores em áreas adjacentes. O valor obtido para  $Z_m$  reflecte algum ajuste do método de previsão, possuindo um desvio que se enquadra dentro da variação média verificada para os dados utilizados na obtenção da equação 8.20.

De acordo com estas observações verifica-se que as equações propostas neste trabalho se podem aplicar a condições de alta energia e, nomeadamente, à área em estudo, ainda que com a possibilidade de gerarem alguma sobrestima. Regista-se, ainda, a necessidade de obtenção de dados adicionais para condições energéticas elevadas e para praias com características granulométricas distintas, por forma a permitir uma utilização das formulações apresentadas mais segura e a uma escala mais abrangente.

## 8.8. SÍNTESE

A síntese efectuada para este capítulo de análise à mesoescala (variações diárias), é sobretudo baseada nos resultados e conclusões extraídos dos dados obtidos nas campanhas Tocha 92 e Areão 95, onde a face da praia mostrou um comportamento genericamente reflectivo, com domínio de rebentação do tipo mergulhante. Em alguns casos, em particular no que respeita à determinação da profundidade de mistura, recorreu-se a dados complementares de praias do Algarve, mas com comportamento morfodinâmico da face da praia genericamente semelhante.

### 8.8.1. Variações volumétricas

Tendo por base a análise e a comparação volumétrica dos perfis obtidos nas duas campanhas mencionadas, foi possível concluir da existência de elevada variação lateral nas diferenças volumétricas das praias estudadas. Esta variação esteve, por vezes, associada à existência e migração de formas rítmicas ("beach cusps"). A utilização de um valor médio, em cada dia, permitiu suavizar as diferenças observadas e obter uma noção de conjunto do comportamento global da praia emersa relativamente às condições de agitação. Contudo, verificou-se que a comparação volumétrica efectuada não permitiu a obtenção de resultados concordantes com as variações de comportamento (perfil de berma *versus* perfil de barra) observadas no

campo. Este facto está igualmente expresso na inadequação das formulações existentes quando comparadas com as diferenças volumétricas diárias, tendo-se obtido cerca de 40% a 50% de previsões erradas. Tal poderá dever-se a:

- existência de um tempo de resposta do perfil de praia relativamente à agitação vigente, até se atingir o equilíbrio para essas condições;
- ocorrência de fortes variações laterais que dificultam a obtenção de valores volumétricos representativos;
- aplicação das formulações a dias onde as variações volumétricas globais foram reduzidas, sendo difícil determinar correctamente o sentido evolutivo.

Deve registar-se que apenas na situação de temporal (final da campanha Tocha 92) se observou uma resposta directa e semelhante em todos os perfis, com tendência notoriamente erosiva.

Do exposto, pode concluir-se que as variações volumétricas diárias, acima do nível médio do mar, dificilmente conseguirão, por si só, explicar as tendências de comportamento observadas nas praias (transição barra/berma), não sendo suficientes para tal discriminação, à mesoescala. Contudo, os resultados obtidos na aplicação à macroescala foram globalmente satisfatórios. Consegue-se, assim, salientar as dificuldades e incertezas existentes quando se utilizam os mesmos métodos em escalas dimensionais e temporais distintas, não se devendo recorrer à sua utilização sem testes prévios, ainda que tenham funcionado prévia e adequadamente para outra escala.

#### 8.8.2. Transição barra/berma

Considerando o comportamento morfológico, em vez do volumétrico, e utilizando algumas considerações relativamente à formação ou destruição da berma, foi possível determinar o sentido evolutivo das praias, em cada dia. Comparando os resultados obtidos com as previsões baseadas nas condições hidrodinâmicas, sedimentares ou morfológicas, verificou-se uma melhor correspondência entre comportamento previsto e observado, com acerto em 80% a 85% dos casos.

A comparação entre os limites definidos pelos vários autores e o ajuste de cada índice aos dados de campo, permitiu considerar que os índices K (Dean, 1973) e *c* (Larson e Kraus, 1989) são os mais adequados à área de estudo, com os seguintes

limites a serem propostos:

$c < 1.75$ ou $K < 5.6$	desenvolvimento de perfil de berma;
$1.75 < c < 1.9$ ou $5.6 < K < 6.1$	transição ou estabilidade;
$c > 1.9$ ou $K > 6.1$	desenvolvimento de perfil de barra.

Com este tipo de previsão será possível conhecer o sentido de evolução da praia, tendo por base os parâmetros diários de agitação e os valores médios do comportamento sedimentológico. Desta forma, será possível possuir, em tempo real, uma ideia qualitativa do sentido de deslocação da praia.

A aquisição de um conjunto de dados mais vasto torna-se necessário, não só para validar de forma mais correcta os limites obtidos, como ainda para possibilitar a obtenção de relações não apenas qualitativas (sentido de evolução) mas também quantitativas (taxa diária de recuo da berma, por exemplo). Isto é, permitir saber para que valores as bermas entram em recuo (ou em formação) e qual a associação entre os coeficientes  $K$  e  $c$  com o valor diário de recuo/acreção.

### 8.8.3. Altura da berma

Após uma escolha dos dias onde foi possível definir a cota da crista da berma como sendo modelada pelas condições de agitação vigentes nesses dias, compararam-se os valores previstos pela aplicação da formulação de Takeda e Sunamura (1982 *in* Sunamura, 1989) com os valores registados no campo. Foi, no entanto, necessário efectuar uma adaptação da equação às condições mesotidais, rescrevendo a equação tal como se encontra na expressão 8.5, que foi a utilizada. Registou-se uma boa correspondência entre os dados observados e as previsões, quer utilizando o coeficiente empírico de Takeda e Sunamura ( $A' = 0.125$ ), quer recorrendo ao valor do melhor ajuste possível aos dados ( $A' = 0.131$ ).

No entanto, a equação 8.5 não contabiliza o efeito da morfologia da praia, visto que apenas depende das condições hidrodinâmicas, não permitindo uma separação de valores para praias de comportamento distinto sujeitas ao mesmo tipo de ondulação. Assim, testou-se ainda a possível ocorrência de relação entre o nível máximo de "runup" e a altura da berma, o que poderá ser válido para condições de

acrecção. Esse nível é dependente da agitação e da morfologia, através da influência do pendor da face da praia. Concluiu-se que o somatório directo do nível de "runup" previsto pela equação 6.15 e do nível máximo de maré vigente permite determinar, de forma relativamente ajustada, a elevação da berma verificada. Os valores previstos foram, em média, cerca de 10% inferiores aos observados, pelo que se determinou um coeficiente empírico para a área em questão.

As formulações obtidas poderão ser utilizadas no dimensionamento de bermas, caso se efectuem realimentações artificiais na região. Desta forma, será possível calcular, com base em critérios hidrodinâmicos e morfológicos, valores máximos e médios de bermas naturais, recriando essas condições com sedimentos artificialmente depositados.

#### 8.8.4. Declive da face da praia

Utilizando os dados das campanhas Tocha 92 e Areão 95, testou-se a solução proposta por Sunamura (1984) como forma de previsão do declive da face da praia em função das condições de agitação e do diâmetro médio do sedimento. Verificou-se um desajuste evidente das previsões caso se recorresse às condições de rebentação sobre a face da praia. No entanto, a utilização de valores de altura da onda na primeira linha de rebentação ou ao largo produziu resultados genericamente melhores, com a obtenção das equações 8.15 e 8.16. Tal facto tinha já acontecido em previsões anteriores, onde a utilização de valores de alturas de ondas ao largo ou na linha de rebentação mais afastada permitiram melhores ajustes do que os valores da rebentação sobre a face da praia, mesmo quando se pretendem avaliar alterações morfológicas da praia emersa. Tal dever-se-á à possibilidade de propagação de uma "memória" da agitação incidente através da zona de "surf" e das próprias linhas de rebentação iniciais, sendo essa "memória" transmitida, possivelmente, através de ondas infragravíticas. A inexistência de medições dos níveis de oscilação e do espectro das ondas não permitiu avaliar a validade desta hipótese.

Apesar das melhorias introduzidas com a utilização da agitação afastada da face da praia, a fiabilidade dos métodos de previsão continuou a ser relativamente baixa, imperando a dispersão dos valores, traduzida pelos relativamente baixos valores de correlação obtidos ( $r = 0.79$  e  $r = 0.71$ , respectivamente para as equações 8.15 e

8.16), apesar de significativos a mais de 99%.

Uma previsão mais ajustada do declive da face da praia seria igualmente útil para situações de realimentação artificial da praia emersa, com recriação de perfis adequados às condições de agitação vigentes nos dias em que as realimentações se processassem. Desta forma, o processo de "naturalização" da praia seria mais fácil, evitando a perda excessiva de material ou o desenvolvimento de escarpas. Por outro lado, um controlo sistemático do declive natural e a sua comparação com o declive teórico permitiria saber se a praia se comportaria de forma mais reflectiva ou dissipativa face a situações de perda ou ganho sedimentar associadas a factores exógenos (ex.: existência de paredões ou de esporões, realimentações, etc.).

#### 8.8.5. Profundidade de mistura

O conjunto de dados das 6 campanhas realizadas na costa algarvia e de todos os disponíveis na literatura, permitiu determinar novas formulações relativas à previsão da profundidade de mistura, em função da altura da onda na rebentação e do declive da face da praia. Esta última variável foi pela primeira vez introduzida neste tipo de equações, permitindo uma aplicação mais generalizada e não apenas representativa de um determinado tipo de praia (dissipativa ou reflectiva), como acontecia até ao momento.

As equações de previsão obtidas, para a profundidade média (8.20) e máxima (8.21) de remobilização, relacionam parâmetros para os quais se verificou a existência de elevado grau de correlação. No entanto, não foram incluídas no seu cálculo situações de agitação de elevada energia, pelo que a sua aplicação poderia ser restrita a praias de energia moderada a baixa. Recorrendo aos dados da campanha LUAR Mira-Tocha, realizada na área de estudo e com alturas de onda na rebentação de 3 m, foi possível verificar que as formulações obtidas possibilitam a obtenção de valores relativamente adequados para tais situações, ainda que com alguma possibilidade de sobrestima. Será, contudo, necessária a obtenção de um maior número de dados, com vista a esta validação.

A existência de uma única equação que permita a previsão da profundidade de mistura para praias de características morfodinâmicas distintas constitui um avanço relativamente às formas de previsão existentes e permitirá aplicações mais correctas no

cálculo do transporte sedimentar. Este tipo de utilização poderá ser efectuada tanto para estimativas baseados em trabalhos de campo com recurso a traçadores como para modelos que utilizem (ou venham a utilizar) a espessura da camada sedimentar transportada.

## 9. ESTUDOS MORFODINÂMICOS DE MESOESCALA - PARTE II (Efeito de tempestades)

### 9.1. INTRODUÇÃO E CONCEITOS TEÓRICOS

#### 9.1.1. Importância, actuação e efeitos de tempestades

Apesar das praias estarem constantemente a ser moldadas pela acção de ondas, ventos e marés, as maiores e mais dramáticas alterações costeiras ocorrem durante tempestades (Birkemeier, 1979). Em alguns casos, os efeitos dos eventos extremos determinam, inclusive, a evolução histórica da linha de costa (Russell, 1993), nomeadamente quando a mobilidade de areias, de longo-termo e a larga-escala, é parcialmente controlada por tempestades intensas (Morton *et al.*, 1995). As tempestades podem, também, ser o factor mais importante no controlo do movimento de curto-prazo da linha de costa, nomeadamente em locais onde a alimentação da praia depende inteiramente da erosão a barlar (Morton *et al.*, 1995). Este é o caso da área em estudo, na actualidade, onde as fontes sedimentares primárias (rios, deriva litoral, deltas e barras submersas, etc.) estão extremamente debilitadas ou esgotadas devido a causas naturais e antrópicas (Ferreira, 1993; Teixeira, 1994). Desta forma, tal como indicado por Carter (1988) e, posteriormente, por Morton *et al.* (1995), a erosão de praias, dunas e arribas pode tornar-se a fonte mais importante de areia para as praias a sotamar. Essa erosão é promovida pela acção esporádica das tempestades, que determina o recuo efectivo da linha de costa.

Para além deste efeito de grande escala, alguns outros, igual ou ainda mais importantes e interrelacionados, justificam o estudo dos temporais:

i) as tempestades podem ser devastadoras, induzindo perda de vidas humanas e danos avultados;

ii) em costas de barreira ou com cordão dunar frontal, a subida do nível do mar associada aos temporais leva à existência de galgamentos;

iii) os grandes volumes de areia transferidos, em tempestades, podem ser responsáveis por uma brusca alteração nas posições da linha de costa;

iv) os danos causados por tempestades em estruturas de engenharia costeira são frequentes e elevados, havendo exemplos claros de tal facto em Portugal;

v) a acção de temporais revela periodicidade na erosão, sugerindo que a localização e magnitude dos riscos associados aos temporais se distribuem de forma sistemática (Dolan e Hayden, 1981).

Por todas estas razões, o estudo da resposta das praias às tempestades reveste-se de extrema importância para a compreensão da dinâmica litoral e na previsão da evolução da linha de costa, constituindo base fundamental para a correcta planificação e gestão da zona costeira. A determinação da variação espacial e temporal do perfil de praia tem, ainda, aplicação directa em projectos de engenharia costeira envolvendo alimentação de praias e construção de estruturas.

Para uma melhor compreensão dos processos associados à erosão por tempestades, convém analisar a forma de actuação e as consequências morfodinâmicas destes eventos sobre as praias e dunas.

Os primeiros estudos sobre erosão associada a tempestades (ex.: Johnson, 1949, 1952) pressupunham que as ondas de tempestades possuíam maior declividade do que as restantes ondas incidentes, relacionando o aumento da declividade das ondas com o início de formação de um perfil de tempestade. Contudo, tal hipótese nunca foi demonstrada no campo, de forma efectiva (Komar, 1976), sendo até posta em causa por alguns autores (Silvester e Hsu, 1997). Para casos reais, foi unicamente determinado que a um aumento na altura da onda corresponde o aparecimento de um perfil de praia mais dissipativo. Desta forma, a dependência relativa à altura da onda parece ajustada. No entanto, a dependência relativamente ao período não é clara (Komar, 1976). Recentemente, Russell (1993) refere que a erosão de praias dissipativas durante temporais e as consequentes variações morfológicas parecem não estar exclusivamente relacionadas com as maiores ondas incidentes de tempestade, cabendo a movimentos de baixa frequência (ondas infragravíticas) a tarefa de transferir a informação da tempestade para a zona de "surf" interna e para a linha de costa.

Um outro factor extremamente influente na variabilidade morfológica da praia é a acumulação de água induzida pela agitação marítima incidente contra a costa, que em conjunção com os ventos dirigidos para terra e com as baixas pressões, leva à criação de sobreelevações do nível do mar durante as tempestades. Em costas abertas, as sobreelevações raramente excedem 0.5 m - 0.6 m mas em mares semi-fechados e pouco profundos podem atingir vários metros de altura (Carter, 1988). Convém referir que, apesar da costa oeste portuguesa ser uma costa aberta, ocorrem com alguma

frequência valores de sobrelevação superiores a 0.5 m - 0.6 m, tendo-se inclusive registado sobrelevações com o dobro destes valores (Taborda e Dias, 1992; Gama *et al.*, 1994a). Tais sobrelevações vão permitir a existência de um plano de água mais elevado, potenciando as consequências da tempestade sobre a praia e duna (Wise e Kraus, 1993; Dolan e Davis, 1994; Van de Graaff, 1994). Um outro efeito consiste na geração de fortes correntes de fundo, dirigidas para o largo, devidas ao gradiente de pressão hidrostática transversal à praia, induzido pela própria elevação das águas costeiras (Bradshaw *et al.*, 1991; Héquette e Hill, 1993).

A combinação da acção erosiva sobre a face da praia e do transporte sedimentar por correntes de fundo para o largo permite a transformação do perfil de praia, por transferência sedimentar da parte emersa para a parte submersa (Komar, 1976; Birkemeier *et al.*, 1987). Esta transição, associada à variação barra-berma, é o aspecto dominante da variação da praia, em tempestades, explicando mais de metade das suas alterações, de acordo com Lins (1985). Para este autor, outras variações importantes são, por ordem decrescente, a formação de um terraço, a existência de sistemas lomba-canal e a origem de uma barra de tempestade, efémera. Na realidade, a resposta da praia à acção de um temporal pauta-se pela tentativa de criar formas submersas que permitam reduzir a energia das ondas incidentes, forçando a sua rebentação mais ao largo (Carter, 1988; Balsillie, 1997). O balanço do transporte transversal à praia é dado por um equilíbrio entre: i) o transporte médio para o largo, associado às correntes de fundo ("undertow"); ii) o transporte para o largo devido às oscilações infragravíticas na velocidade da corrente transversal à costa; iii) o transporte para terra devido à assimetria no campo de velocidades das ondas incidentes (Russell, 1993). Nos estudos efectuados por este autor, durante o pico de erosão da praia o transporte oscilatório foi totalmente dominado pela componente infragravítica, sendo o transporte associado às ondas gravíticas praticamente negligenciável. Desta forma, Russell (1993) conclui que a componente infragravítica e o transporte médio de fundo, são os mecanismos pelos quais a praia emersa é erodida durante tempestades e os sedimentos transportados para maiores profundidades.

A dispersão do sedimento erodido segue dois percursos. Por um lado, o sedimento move-se longilitoralmente, enquanto que, simultaneamente, o sedimento é depositado na parte submersa da praia, levando à geração de uma ou mais barras submersas (Komar, 1976; Birkemeier *et al.*, 1987; Carter e Stone, 1989; Fredsøe e

Deigaard, 1992; Larson e Kraus, 1994). De forma geral, quanto mais elevada a altura da onda e menor o pendor da praia, mais ao largo se produzirão as barras submersas (Hsu e Wang, 1997). Em casos de tempestades com duração elevada, a barra interna gerada move-se para o largo podendo, por vezes, associar-se à barra externa. Esta, formada em tempestades maiores, pode existir por largos períodos (meses a anos), tendendo a migrar para terra e a diminuir de amplitude, em períodos de baixa energia (Lee *et al.*, 1995).

O nível de actuação das tempestades é dependente da sua severidade mas, também, da possível sucessão de temporais. Em alguns casos, para colmatar a necessidade de sedimento imposta pela acção de uma ou mais tempestades, pode ocorrer erosão da alta praia ou da arriba, existindo alguns factores que potenciam esse processo (Carter, 1988):

- i) em tempestades, a elevação do nível do mar por acção das ondas (“wave set-up”) pode aumentar significativamente;
- ii) a sobrelevação de índole meteorológica pode ser extremamente importante, levando a uma incursão horizontal adicional;
- iii) as “edge waves” podem tornar-se dominantes no espectro do espraio;
- iv) a existência de ondas quase solitárias, de grande período, aumenta a proporção de massa de água acima do nível estático do mar.

Outras condicionantes importantes para a determinação do volume erodido são: a forma e o estado da praia antes do temporal (Balsillie, 1985; Van de Graaff, 1986; Morton *et al.*, 1995; Fucella e Dolan, 1996); o intervalo entre tempestades sucessivas, com a erosão a ser mais acentuada quando o intervalo entre tempestades é inferior ao período de recuperação da praia (Morton *et al.*, 1995); e a duração do evento (Balsillie, 1985; Kriebel e Dean, 1993).

A ocorrência, em conjunto, de alguns ou de todos os factores apontados por Carter (1988) contribui para que a cota atingida pela acção directa do mar seja mais elevada, actuando directamente sobre a duna. Nestes casos, pode ocorrer saturação do sedimento com água, e conseqüente liquefacção dos sedimentos da base da duna, causando o seu colapso sobre a praia e implicando um aumento do ângulo de repouso. Caso este ângulo exceda o limite de estabilidade, promove-se a queda total da face da duna ou da arriba formada (Carter e Stone, 1989). Sendo as arribas dunares usualmente talhadas em sedimento solto, facilmente desagregável, as taxas de recuo

são normalmente elevadas, em curtos períodos, podendo atingir alguns metros em poucas horas (Carter e Stone, 1989). Tal facto foi confirmado em trabalhos de campo conducentes a esta dissertação, para o troço entre Costa Nova do Prado e Praia do Areão.

Após a acção de tempestades, o sedimento volta a ser parcial ou totalmente transferido para a praia emersa, pela acção das correntes geradas pela agitação incidente, ainda que a um ritmo variável e, geralmente, bastante inferior ao ritmo erosivo (Russell, 1993; Larson e Kraus, 1994; Lee *et al.*, 1995). No entanto, essa transferência pode ser, em alguns casos, bastante rápida (algumas horas a poucos dias), como verificado por Birkemeier (1979) e por Martins *et al.* (1996, 1997).

De acordo com Morton *et al.* (1995), em áreas onde a erosão a barlamar é a fonte principal de areia para a praia, e em condições de subida do nível do mar e de redução do fornecimento sedimentar, as futuras tempestades terão um impacto ainda maior e causarão uma erosão costeira mais acentuada, especialmente em locais onde as actividades humanas compartimentaram a costa e reduziram o fornecimento natural de areia às praias. Esta conclusão, apresentada pelos autores com base na análise de praias oceânicas de ilhas barreira do Texas, EUA, parece aplicar-se de forma correcta e integral à área em estudo nesta dissertação.

Neste capítulo não se pretendem estudar os mecanismos que promovem a erosão costeira durante temporais, nem a forma como se desenvolvem. Pretende-se sim, testar a validade de formulações matemáticas simples propostas por outros autores e tentar prever as variações volumétricas e morfológicas induzidas por temporais tipo na costa em estudo. Para tal, ter-se-ão em atenção os mecanismos atrás descritos e a importância dos factores físicos forçadores da evolução costeira (ondas, níveis extremos, morfologia, etc.). As formulações serão validadas com base em dados de campo.

#### 9.1.2. Métodos de determinação de erosão de praias e dunas por tempestades

A previsão de variações no perfil de praia devido a alterações hidrodinâmicas tem sido um desafio para muitos investigadores, nas últimas décadas (Roelvink e Brøker, 1993), daí resultando o desenvolvimento e avaliação de uma variedade de modelos. Entre os muitos trabalhos que abordam a previsão e quantificação da erosão

da praia e da duna associada a tempestades devem referir-se, pela sua importância e frequência de citação na literatura, os de Dean e Maurmeyer (1983), Balsillie (1984b, 1985, 1986, 1997), Kriebel (1984a,b, 1986), Kriebel e Dean (1985), Sargent e Birkemeier (1985), Van de Graaff (1986, 1994), Birkemeier *et al.* (1987), Kobayashi (1987), Larson *et al.* (1988, 1990), Overton e Fisher (1988), Larson e Kraus (1989), Dean (1991), Fredsøe e Deigaard (1992), Roelvink e Brøker (1993), Kriebel e Dean (1993), Lee *et al.* (1995, 1996) e Schooness e Theron (1995). De entre os mais recentes, três deles (Roelvink e Brøker, 1993; Van de Graaff, 1994; Schooness e Theron, 1995) analisaram vários modelos diferentes, comparando-os e avaliando-os relativamente às suas capacidades de previsão.

Em Portugal este tema também tem sido objecto de estudo nos últimos anos, podendo ser consultada a aplicação de alguns modelos a casos portugueses nos trabalhos de Ferreira (1993, 1994), Ferreira *et al.* (1995), Ferreira e Dias (1997) e Gama (1997).

Caso se efectue uma análise à bibliografia atrás citada, verifica-se a existência de variados modelos, com abordagens e conceitos distintos, sendo difícil a selecção de um modelo para aplicação a determinado sector costeiro. Alguns autores ensaiaram a classificação dos modelos em diferentes tipos, pretendendo dessa forma homogeneizar alguns dos conceitos requeridos e estabelecer paralelismos entre os métodos existentes.

Dean e Maurmeyer (1983) separaram métodos cinemáticos (onde se assegura a conservação do volume sedimentar através da translação do perfil, sem mudança de forma) de modelos dinâmicos (onde se assume uma modificação do perfil até atingir o equilíbrio). Birkemeier *et al.* (1987) preferem distinguir modelos desenvolvidos com base em relações teóricas, para cálculo da taxa de transporte transversal, de modelos de base empírica. Roelvink e Brøker (1993) alargam a divisão, tornando-a mais abrangente, e referem a existência de modelos descritivos, modelos de perfil de equilíbrio, modelos de evolução empírica do perfil e modelos baseados nos processos, também referidos como determinísticos. Estes autores avaliam cinco destes últimos modelos. Schooness e Theron (1995) tornam a reclassificar os modelos existentes, colocando-os em três grandes grupos: empíricos, hidráulicos e numéricos, analisando dez destes últimos.

Conclui-se, assim, da inexistência de uma classificação tipológica concreta e abrangente para os diferentes modelos existentes, dependendo esta apenas dos objectivos de cada autor ou grupo de autores. Na realidade, a interligação de diferentes tipos de análises (teóricas, empíricas, etc.) num mesmo modelo faz com que se torne difícil, actualmente, a separação em grupos estanques.

Mais importante do que o exercício de classificação dos modelos em tipos concretos, será a determinação de quais os parâmetros necessários para um modelo proporcionar resultados fiáveis relativamente às observações de campo. Também aqui ocorrem divergências entre autores, ainda que os parâmetros fundamentais sejam considerados por quase todos. Birkemeier *et al.* (1987) são os primeiros autores a apontar exaustivamente quais as características requeridas por um *modelo ideal* de previsão de variação do perfil de praia, divididas em vários grupos:

- Dados a introduzir, condições iniciais e fronteiras:
    - i) características da onda;
    - ii) propriedades do sedimento da praia;
    - iii) perfil inicial;
    - iv) profundidade de fecho;
    - v) limite interno, em terra, do perfil;
  - Cálculos
    - i) cálculo para ondas incidentes, ondas infragravíticas e correntes induzidas;
    - ii) cálculo ou especificação do nível do mar, incluindo sobreelevação;
    - iii) cálculo do transporte transversal;
    - iv) cálculo da variação do perfil, com conservação do volume;
  - Propriedades
    - i) representação de formação, movimentação e destruição de barras;
    - ii) determinação precisa, espacial e temporal, dos perfis de erosão e de deposição e produção de um perfil de equilíbrio;
    - iii) verificação dos resultados;
  - Extensibilidade
    - i) compatibilidade com previsões estocásticas ou probabilísticas;
    - ii) possibilidade de introdução de ondas irregulares (ou de espectros reais).
- Como facilmente se compreende, um modelo que inclua todas estas condições

não será fácil nem simples de elaborar ou de utilizar, pelo que, seria muito difícil de aplicar. O sentido realista dos autores levou a que referissem, também, quais as características necessárias de um *modelo pragmático*:

- a) inclusão de altura e período da onda ao largo;
- b) introdução do nível do mar, incluindo a sobrelevação;
- c) utilização da dimensão média do sedimento;
- d) uso de um perfil inicial;
- e) definição de um limite interno de erosão dunar;
- f) cálculo do transporte transversal ou cálculo directo da variação morfológica do perfil, com base numa formulação;
- g) inclusão de um procedimento para calcular a erosão dunar;
- h) verificação de campo.

Desta forma, será possível construir modelos mais simples e mais intuitivos, com capacidade de representação dos efeitos de tempestades em praias e dunas.

Para além destes parâmetros, vários autores têm vindo a determinar a existência de um outro factor fundamental na previsão de volumes de erosão, a introdução da dependência temporal da erosão relativamente aos mecanismos forçadores. Nomeadamente, relativamente à duração da sobrelevação (Balsillie, 1984b, 1985, 1986, 1997; Kriebel, 1984a,b, 1986; Kriebel e Dean, 1993; Wise e Kraus, 1993; Van de Graaff, 1994; Schooness e Theron, 1995).

Um dos factores que tem condicionado de forma decisiva a aplicação dos modelos é a escassez de dados de campo que permitam a sua efectiva calibração (Kriebel, 1984a,b, 1986; Kobayashi, 1987; Larson *et al*, 1988). No trabalho analisado mais completo sobre teste e verificação de modelos (Schooness e Theron, 1995) refere-se que existe clara falta de dados para eventos de acreção (recuperação pós-tempestade) ou para eventos erosivos com alturas de onda significativa superiores a 2.5 m. Dado que na costa oeste portuguesa só se considera que há temporal quando a altura significativa excede os 5 m, é evidente que grande parte dos modelos não se adequam a estas condições limite. Aliás, é referida por vários autores (Kriebel, 1986; Van de Graaff, 1994; Schooness e Theron, 1995) a necessidade de uma continuada e aumentada verificação dos modelos desenvolvidos, englobando a sua comparação relativa.

A análise detalhada dos modelos existentes e das suas aplicações leva, ainda, a concluir que não existe uma teoria universalmente aceite para o cálculo da transferência sedimentar transversal à praia (Lee *et al.*, 1996) e que nem sequer se consegue determinar, na prática, quais são os melhores modelos (Schooness e Theron, 1995). Para estes autores, cada modelo poderá ser melhor do que outro para determinada condição específica de aplicação. Por outro lado, os métodos existentes estão em constante aperfeiçoamento, pelo que a avaliação comparativa é apenas precisa para um curto período de tempo.

Torna-se, no entanto, necessária a escolha de um ou mais modelos para aplicação directa às praias em estudo. Partindo do princípio que qualquer modelo é bom se provar ser eficaz para as condições de aplicação, não se eliminou à partida nenhum dos potenciais candidatos de entre os vários modelos disponíveis na literatura. Contudo, tornou-se necessário estabelecer critérios de escolha, por forma a garantir alguma qualidade na aplicação e, também, uma intuitiva percepção física do método. Assim, estabeleceram-se os seguintes critérios de escolha:

- i) modelos de aplicação versátil (vários tipos de praias);
- ii) modelos com critérios morfológicos;
- iii) modelos de aplicação simples, sem requererem cálculos matemáticos complexos;
- iv) modelos com componentes empíricas importantes (permitem percepção física e ajuste de campo);
- v) modelos com dependência temporal;
- vi) modelos testados com dados de campo.

Da análise crítica dos vários modelos em função dos estes critérios definidos escolheram-se três possíveis de utilizar:

- Modelo de Vellinga (Vellinga, 1982; Van de Graaff, 1986);
- Modelo MSBWT - *Multiple Shore-Breaking Wave Transformation Model* (Balsillie, 1984b, 1985, 1986, 1997);
- Modelo de convolução (Kriebel e Dean, 1993).

Os modelos referidos perfazem a generalidade das condições expressas, bem como das referidas por Birkemeier *et al.* (1987), ainda que apresentem limitações:

- a) o modelo de Vellinga possui uma dependência temporal relativamente mal

definida, estando apenas expresso que o volume de erosão deve ser aumentado entre 5% a 10% por cada hora extra em que o nível de sobrelevação se mantém elevado, além das 5 horas de duração da tempestade, até um máximo adicional de 50% do valor inicialmente calculado;

b) o modelo MSBWT não engloba, nos cálculos de erosão, parâmetros dos perfis, pelo que o critério morfológico não é estritamente contemplado;

c) o modelo de convolução não possui, ainda, uma verificação extensiva a vários tipos de praias.

De entre estes modelos, Ferreira (1993) tinha já referido a inadequação do modelo de Vellinga, criado e testado em praias holandesas, relativamente às praias do sector Aveiro - Cabo Mondego. O autor aponta como causas prováveis para o desajuste:

i) a diferença morfológica entre as praias da zona de estudo e a morfologia representada pelos perfis de praia reproduzidos pelo modelo;

ii) as diferenças de regime e efeito da agitação marítima na costa portuguesa relativamente à costa holandesa, nomeadamente na duração das tempestades e nos volumes de erosão;

iii) o desenvolvimento do modelo para temporais com elevados picos de sobrelevação (3 m a 4 m acima do nível médio do mar).

É interessante referir que Van de Graaff (1994), um dos autores mais empenhados no teste e aplicação do modelo de Vellinga, refere que este não funciona para sobrelevações modestas, não podendo a erosão da praia ser prevista nesses casos, dado que o método foi testado para a Holanda e em condições de sobrelevação extremas. Esta conclusão é concordante com as causas apontadas por Ferreira (1993).

Optou-se, assim, por não englobar o modelo de Vellinga neste estudo, testando-se a aplicabilidade dos outros dois métodos a casos específicos e a casos hipotéticos. Deve salientar-se, desde já, a complementaridade dos métodos escolhidos. Efectivamente, o modelo MSBWT, unicamente baseado em formulações empíricas, é de aplicação a troços costeiros na sua globalidade, visto não englobar parâmetros morfológicos na determinação dos volumes de erosão. Pelo contrário, o método de Kriebel e Dean baseia toda a sua concepção nos parâmetros morfológicos de cada praia específica, pelo que é talhado para uma aplicação praia a praia. Os conceitos teóricos dos dois modelos são apresentados de seguida.

### 9.1.3. Modelo MSBWT

#### 9.1.3.1. Descrição do modelo

Este modelo, desenvolvido e aperfeiçoado por Balsillie (1984b, 1985, 1986, 1997), resultou de uma série de investigações sobre as condições na rebentação, tendo sido criado, inicialmente, com vista à determinação de costas potencialmente inundáveis por uma tempestade ou furacão. O modelo assume que a dissipação de energia na zona de "surf" não é uniforme, mas que se fará preferencialmente entre a rebentação e o local de reformulação das ondas incidentes, após a rebentação. O modelo incorpora, ainda, os efeitos combinados das ondas e do nível do mar e a sua relação interactiva com o transporte transversal de areias. A quantidade erodida calculada é dependente da sobrelevação e da duração do evento, englobando assim a dependência temporal.

As fórmulas inicialmente utilizadas no modelo (Balsillie, 1986) foram baseadas na análise erosiva de 22 eventos extremos (16 furacões e 6 tempestades), com registos médios de erosão entre 12 m<sup>3</sup>/m e 200 m<sup>3</sup>/m, em cerca de 300 perfis analisados. O autor escolheu dois níveis de referência (nível médio do mar e nível estático do mar no pico do temporal), tendo estabelecido fórmulas empíricas para calcular o volume de erosão acima desses níveis. De acordo com o autor, o nível médio do mar será o nível de referência mais adequado e aquele que é aplicável a todo o tipo de praias, enquanto que o nível de temporal pode ser importante para o desenho de estruturas costeiras.

Da utilização da informação disponível, até 1986, resultaram as formulações:

$$Q_{\text{cavg}} = (g^{0.5} t_r S'^2)^{0.8} / 1665 \quad (9.1)$$

$$Q_{\text{cmax}} = (g^{0.5} t_r S'^2)^{0.8} / 808 \quad (9.2)$$

A equação 9.1 permite o cálculo do volume médio erodido ( $Q_{\text{cavg}}$ , em m<sup>3</sup>/m) acima do nível médio do mar, causado por um temporal com uma sobrelevação máxima  $S'$  (maré astronómica + sobrelevação meteorológica, em metros) e com um tempo de subida  $t_r$  (em segundos), necessário para atingir o pico de sobrelevação. A

equação 9.2 é utilizada na previsão da erosão máxima ( $Q_{e\max}$ ) associada a um temporal, acima do nível médio do mar, que o autor considerou corresponder a 92.5% da função de distribuição de probabilidade de excedência.

As fórmulas correspondentes para o cálculo do volume médio e máximo erodido acima do nível de pico da tempestade ( $Q_e'$ ) são:

$$Q_e'_{\text{avg}} = (g^{0.5} t_r S^{12})^{0.8} / 3125 \quad (9.3)$$

$$Q_e'_{\text{max}} = (g^{0.5} t_r S^{12})^{0.8} / 1720 \quad (9.4)$$

Recentemente (Balsillie, 1997), o autor aumentou a base de dados de campo para 14 eventos de erosão associados a 11 furacões, e 21 eventos erosivos associados a 19 tempestades, analisando algumas centenas de perfis e totalizando o maior conjunto de dados de campo alguma vez utilizado na quantificação de impactos de eventos extremos. Os dados utilizados englobam eventos com valores máximos de sobrelevação entre 1.1 m e 3.86 m acima do nível médio do mar e com um tempo de subida até atingirem esses picos entre 5 h e 51 h, tendo sido responsáveis por volumes médios de erosão entre os 3.9 m<sup>3</sup>/m e os 200 m<sup>3</sup>/m. Com base na totalidade dos dados obtidos e considerando apenas os perfis em que se observou erosão após tempestade (em alguns casos os perfis denotaram estabilidade ou acreção), as fórmulas obtidas passaram a ser:

$$Q_{e\text{avg}} = (g^{0.5} t_r S^{12})^{0.8} / 1622 \quad (9.5)$$

$$Q_{e\text{max}} = (g^{0.5} t_r S^{12})^{0.8} / 738 \quad (9.6)$$

$$Q_e'_{\text{avg}} = (g^{0.5} t_r S^{12})^{0.8} / 3299 \quad (9.7)$$

$$Q_e'_{\text{max}} = (g^{0.5} t_r S^{12})^{0.8} / 1501 \quad (9.8)$$

Caso o autor tivesse considerado a totalidade dos perfis, incluindo os que não demonstraram erosão após eventos extremos, os valores previstos seriam cerca de 25% inferiores aos fornecidos pela aplicação destas fórmulas (Balsillie, 1997).

Relativamente à evolução do perfil durante a tempestade, o modelo assume que a praia é essencialmente composta por areias não consolidadas, que o transporte transversal domina, sendo os processos longilitorais estáticos e negligenciáveis, e que os processos hidrodinâmicos pouco profundos são relativamente constantes a iguais profundidades. O modelo utiliza o perfil real para a morfologia inicial, ainda que para a morfologia da parte submersa possa ser utilizado o perfil de equilíbrio de Dean (1977).

O perfil pós-evento é determinado, na parte submersa, por um dos envelopes de crista da barra ou de cava da barra, dados pelas expressões:

$$d_c = 2(S' + a_s x_c^{2/3})/3 \quad (9.9)$$

$$d_t = S' + 6a_s(x_t + 7S')^{2/3}/5 \quad (9.10)$$

onde os valores de  $d$  (profundidade) definem as linhas que unem as cristas ou as cavas das barras, utilizando para tal as distâncias  $x$ , relativas à posição da linha de costa definida pela intersecção do perfil com o nível médio do mar. Os índices  $c$  e  $t$  indicam, respectivamente, crista e cava da barra, enquanto que  $a_s$  corresponde a um coeficiente de forma, equivalente ao coeficiente empírico  $A$  de Dean (1977).

Acima da posição teórica da linha de costa relativa ao nível médio do mar, a praia apresenta, após a tempestade, um pendor ligeiramente curvo, na continuação do envelope da cava da barra, até ao ponto de intersecção da praia com a linha de máxima elevação durante a tempestade. Para elevações superiores a este ponto de intersecção, Balsillie (1997) admite que a praia possui um perfil 1:1 (45°) até interceptar a berma ou a duna, de acordo com o observado pelo autor em perfis pós-temporal. Este pressuposto de relação 1:1 implica que se gere sempre, em qualquer representação de erosão por temporal, uma escarpa ou uma arriba acima da máxima sobrelevação, o que frequentemente não corresponde à realidade, nas praias em estudo. Nomeadamente, quando não se verifica erosão dunar, mas apenas erosão da berma.

De acordo com o modelo, o recuo da praia pode ser obtido por translação horizontal do perfil criado da forma referida, para terra, desde a posição inicial da linha de costa antes do evento, até que se obtenha o volume previamente calculado (figura 9.1.).

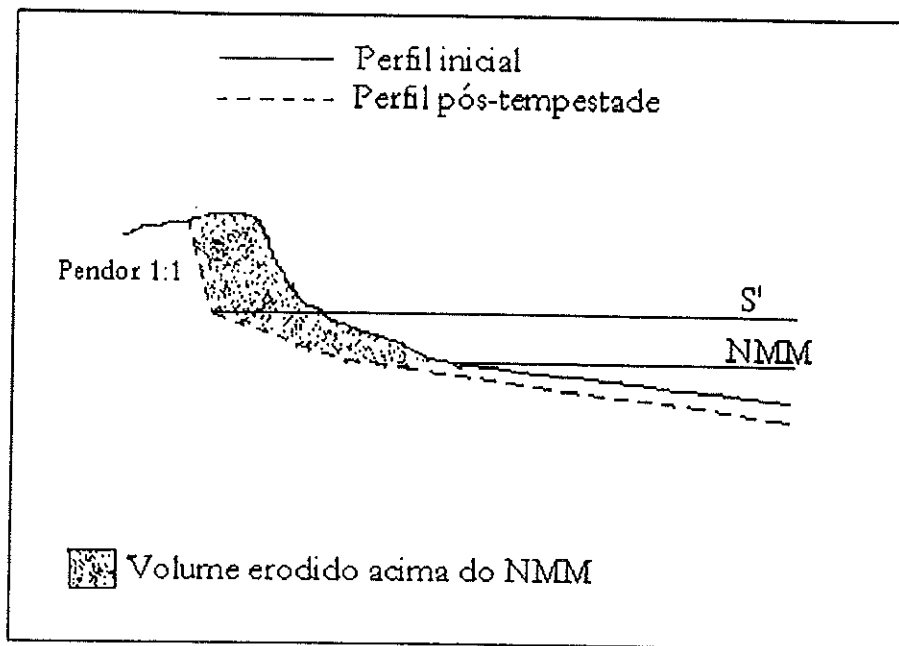


Figura 9.1. Exemplo de aplicação do modelo MSBWT, para determinação do perfil de tempestade (adaptado de Balsillie, 1997); NMM = nível médio do mar, S' = maré astronômica + sobrelevação meteorológica.

#### 9.1.3.2. Análise crítica do modelo

A quantificação do volume de erosão por este método é extremamente facilitada, visto ser apenas necessário um registo da sobrelevação, permitindo o cálculo de volumes de erosão para valores de sobrelevação associados a períodos de retorno determinados. Por outro lado, os cálculos do volume erodido da praia e do perfil pós-tempestade são independentes, pelo que a sua utilização pode ser efectuada de forma separada.

A duração do temporal está englobada através da inclusão do tempo de subida ( $t_r$ ), permitindo uma redução automática relativamente à erosão potencial em situação de equilíbrio, dificilmente alcançável.

O modelo tem uma forte componente empírica, sendo baseado num conjunto de dados muito elevado e abrangendo uma amplitude de valores elevada.

No entanto, a erosão determinada é apenas média ou máxima, para qualquer região, e independente da dimensão do sedimento, do pendor da praia, da morfologia do fundo e da altura da onda, o que torna o problema e o resultado demasiado simplistas. Sendo certo que vários outros autores determinaram que a sobrelevação e a duração da tempestade são os dois principais mecanismos que controlam o volume

de erosão por tempestades (Vellinga, 1982; Kriebel, 1984a, b; Kriebel e Dean, 1985, 1993; Van de Graaff, 1986, 1994; Wise e Kraus, 1993) outros ou os mesmos evidenciaram, ainda, a importância generalizada (ainda que secundária) da altura da onda (Kriebel 1984a, b; Van de Graaff, 1986, 1994; Birkemeier *et al.*, 1987; Kriebel e Dean, 1993; Smith *et al.*, 1993), do tamanho do grão (Kriebel e Dean, 1985; Van de Graaff, 1986; Smith *et al.*, 1993) e do pendor inicial do perfil (Kriebel, 1984a,b; Kriebel e Dean, 1985; Van de Graaff, 1986). O próprio Balsillie (1985) refere que a acção erosiva das ondas deverá ser considerada e que o pendor inicial (Balsillie, 1997) é importante na velocidade da erosão e no volume erodido. Desta forma, o método poderá fornecer bons resultados em algumas praias enquanto que noutras, com distintas condições, será de difícil aplicação, pelo que a inclusão de uma dependência morfológica deveria revelar-se útil.

Birkemeier *et al.* (1987) avaliaram o método concluindo que os resultados obtidos foram satisfatórios, ainda que fosse necessária uma avaliação experimental adicional, nomeadamente em locais com perfis de praia e condições de agitação distintas das que ocorrem nas praias onde foi desenvolvido o modelo. Após a inclusão de uma nova e importante quantidade de dados (Balsillie, 1997), o tipo de praias analisado tornou-se mais abrangente, ainda que as praias americanas da costa Este e do Golfo do México continuem a ser predominantes. Este facto pode condicionar a aplicação do método a zonas costeiras com características distintas.

#### 9.1.4. O modelo de convolução de Kriebel e Dean

##### 9.1.4.1. Descrição do modelo

O modelo de convolução foi desenvolvido por Kriebel e Dean (1993) na sequência de outros métodos e modelos (ex.: Kriebel, 1984a,b; Kriebel e Dean, 1985) e pretende responder à necessidade expressa pelos autores de utilizar métodos simples de previsão de erosão e acreção devidas a variações na ondulação e no nível do mar. O método desenvolvido é, assim, um método analítico, simples, com dependência temporal, adequado a cálculos de erosão de praia e duna por tempestades. Baseia-se em observações de campo para determinar que as praias sujeitas a mecanismos forçadores erosivos respondem tendendo para uma forma de equilíbrio. Os

mecanismos forçadores considerados correspondem às variações induzidas pela tempestade no nível da água, sendo a magnitude da erosão controlada por dois factores:

i) a máxima resposta potencial ou de equilíbrio ( $R_o$ ) que ocorreria se a praia pudesse responder completamente, até atingir esse equilíbrio;

ii) as características de  $T_s$  (escala temporal de resposta do perfil), que governa a taxa de acordo com a qual o perfil responde para um novo equilíbrio.

Kriebel e Dean (1993) desenvolveram soluções fechadas para determinação do máximo potencial de recuo ( $R_o$ ), sendo o seu cálculo dependente das características da tempestade, bem como da morfologia da praia.

No que diz respeito à representação do perfil inicial (antes da tempestade), os autores separam a parte subaérea da parte submersa do perfil. Relativamente à parte superior do perfil, acima do nível médio do mar (NMM), pode introduzir-se um perfil esquemático, com base no perfil real, utilizando para tal os parâmetros B (elevação da berma acima do nível médio do mar), D (altura da duna), W (largura da berma) e  $\tan\beta$  (pendor da face da praia). Para a parte do perfil abaixo do NMM o método recorre ao perfil de equilíbrio desenvolvido por Dean (1977), dado por:

$$d = Ax^{2/3} \quad (9.11)$$

onde  $d$  é a profundidade da água à distância  $x$ , medida a partir da linha de costa dada pela intercepção do perfil com o NMM e  $A$  é um parâmetro empírico de forma do perfil, dependente do tamanho do grão e, como tal, relacionável com o pendor do perfil. O parâmetro  $A$  pode ser calculado pela fórmula:

$$A = 2.25(w_s^2/g)^{1/3} \quad (9.12)$$

onde  $w_s$  é a velocidade de sedimentação e  $g$  a aceleração gravítica.

Para o cálculo do máximo recuo potencial, admitindo tempo suficiente de resposta para o perfil atingir a situação de equilíbrio, os autores desenvolveram uma série de formulações de aplicação dependente do tipo de praia. Desta forma, foram criadas equações para cálculo de erosão em vários perfis de resposta, teóricos: i) perfil

de equilíbrio com berma quadrada; ii) perfil de equilíbrio com pendor uniforme da face da praia; iii) perfil de equilíbrio com dunas e iv) perfil de equilíbrio com berma e dunas (figura 9.2.).

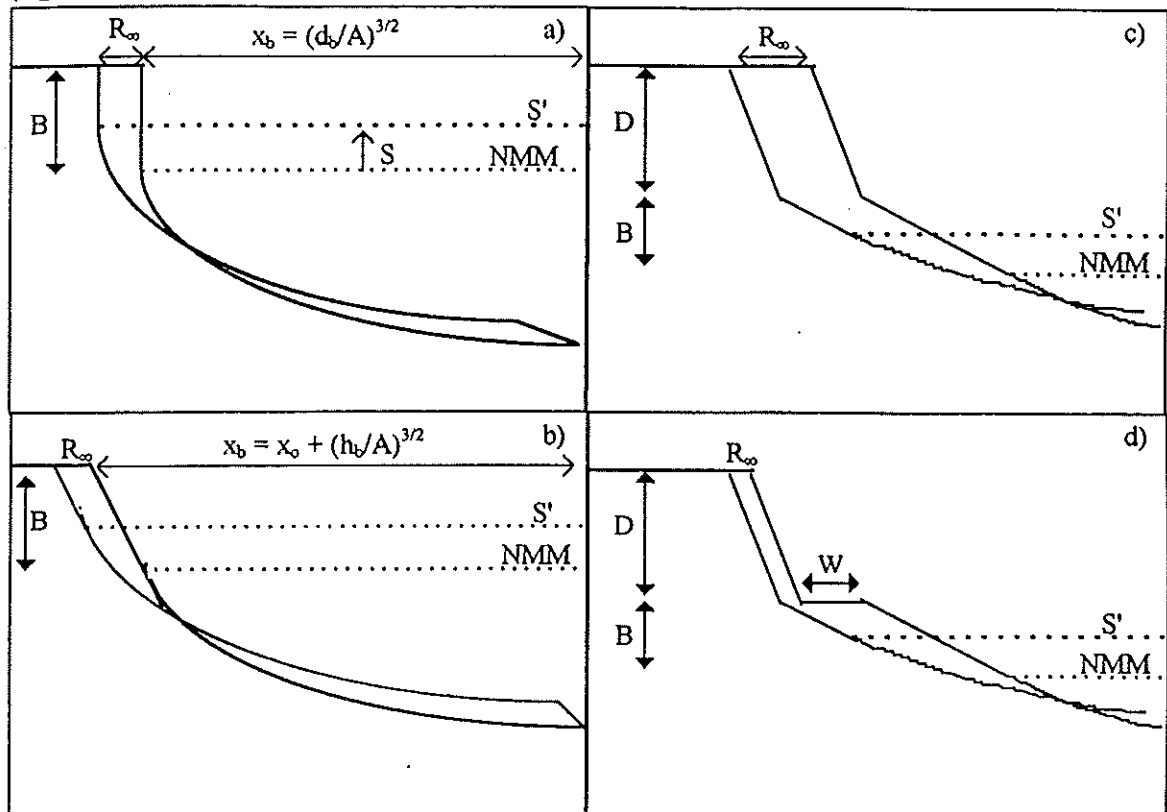


Figura 9.2. Tipos de resposta de perfis: a) perfil de equilíbrio com berma quadrada; b) perfil de equilíbrio com pendor uniforme da face da praia; c) perfil de equilíbrio com dunas e d) perfil de equilíbrio com berma e dunas (adaptado de Kriebel e Dean, 1993). NMM = Nível médio do mar; S' = maré astronômica + sobrelevação meteorológica.

A solução para determinar  $R_{\infty}$  é obtida pela variação do perfil de equilíbrio, verticalmente até à cota  $S'$  = nível extremo atingido (maré + sobrelevação) acima do nível médio do mar (NMM) e, depois, para terra até à distância  $R_{\infty}$ , tal que o balanço de massa seja atingido, entre os volumes erodidos e depositados. A solução utilizada para determinar o recuo até o perfil atingir o hipotético equilíbrio é conseguida igualando o volume erodido da parte sub-aérea com o volume depositado na parte submersa adjacente (até ao local da rebentação).

Utilizando esta metodologia, e para os casos em que o perfil engloba uma berma desenvolvida e uma duna, a solução para a erosão dunar potencial ( $R_{\infty D}$ ) é fornecida pela equação:

$$R_{\infty D} = [S'(x_b - d_b / \tan \beta) / (B + D + d_b - S'/2)] - [W(B + d_b - S'/2) / (B + D + d_b - S'/2)] \quad (9.13)$$

onde  $d_b$  é a profundidade à qual as ondas rebentam, sendo  $d_b = 1.28H_b$  ( $H_b$  = altura da onda na rebentação), e  $x_b$  a distância ao largo à qual as ondas rebentam, dada por:

$$x_b = x_o + (d_b/A)^{3/2} \quad (9.14)$$

O valor de  $x_o$  é geralmente negligenciável, por simplificação, visto ser normalmente muito pequeno (Kriebel e Dean, 1993). Na realidade,  $x_o$  corresponde à distância entre a linha de costa em águas paradas e a origem virtual do perfil de equilíbrio e pode-se calcular utilizando  $x_o = d_T/3 \tan\beta$ , onde  $d_T = 4A^3/9 \tan\beta^2$ .

De acordo com a equação 9.13, quer a altura da duna, quer a presença de uma berma larga, limitam o recuo da face da duna. Na realidade, a berma pode ser tão larga ( $W$  elevado) que o valor de recuo determinado seja negativo ( $R_{\infty D} < 0$ ), indicando que não ocorreu recuo da duna e que apenas a berma foi erodida. Nestes casos, para determinar o recuo potencial da berma ( $R_{\infty B}$ ) estabelece-se  $R_{\infty D} = 0$  e resolve-se a equação em relação a  $W$ , obtendo-se uma solução igual à proposta pelos autores para praias com perfil de equilíbrio e face da praia com pendor uniforme:

$$R_{\infty D} = [S'(x_b - d_b/\tan\beta)/(B + d_b - S'/2)] \quad (9.15)$$

O volume potencial de equilíbrio erodido da praia e duna, acima do pico de sobrelevação, quando ocorre erosão dunar, pode ser fornecido pela equação:

$$V_{S\infty} = DR_{\infty D} + (R_{\infty D} + W)(B - S') \quad (9.16)$$

e o volume acima do NMM por:

$$V_{M\infty} = DR_{\infty D} + (R_{\infty D} + W)B + S'^2/2 \tan\beta - 2S'^{5/2}/5A^{3/2} \quad (9.17)$$

Quando a duna não é atingida ( $R_{\infty D} < 0$ ), esses volumes podem ser dados por:

$$V_{S\infty B} = R_{\infty B}(B - S') \quad (9.18)$$

$$V_{\text{MxB}} = R_{\text{xB}}B + S^2/2 \tan\beta - 2S^{5/2}/5A^{3/2} \quad (9.19)$$

No entanto, como já foi frisado, os valores de  $R_{\infty}$  e  $V_{\infty}$  correspondem a máximos potenciais de recuo do perfil, normalmente não atingidos devido à diferença temporal entre a acção da tempestade e a resposta do perfil. Desta forma, o recuo máximo ( $R_{\text{max}}$ ) não corresponde ao valor potencial, sendo-lhe inferior, e está relacionado com a escala temporal de resposta do perfil ( $T_s$ ), que pode ser calculada pela relação:

$$T_s = C_1 H_b^{3/2} (g^{1/2} A^3)^{-1} (1 + d_b/B + \tan\beta x_b/d_b)^{-1} \quad (9.20)$$

onde  $C_1$  foi determinado empiricamente por Kriebel e Dean (1993), possuindo um valor igual a 320.

Para determinar  $R_{\text{max}}$  é necessário calcular a taxa de erosão esalo-temporal ( $\beta$ ) relativa à duração da tempestade ( $T_D$ ), sendo:

$$\beta = 2\pi(T_s/T_D) \quad (9.21)$$

Esta razão é superior para temporais com menor duração e ondas maiores (ex.: furacões) e menor para tempestades longas com ondas pequenas. No limite, se a tempestade tiver uma duração tal que permita à praia atingir o equilíbrio,  $\beta$  seria igual a zero e  $R_{\text{max}} = R_{\infty}$ . Assim, quanto menor o valor de  $\beta$ , maior será o valor de  $R_{\text{max}}$ , para o mesmo valor de recuo potencial ( $R_{\infty}$ ). Após o cálculo do valor de  $\beta$ , é possível determinar a razão  $R_{\text{max}}/R_{\infty}$  de duas formas, numerica e graficamente.

#### *Método numérico*

Neste método, a relação entre o recuo máximo e o recuo potencial é expressa por:

$$R_{\text{max}}/R_{\infty} = [1 - \cos(2\sigma t_m)]/2 \quad (9.22)$$

sendo  $\sigma = \pi/T_d$  e  $t_m$  o tempo a que ocorre a máxima erosão. O cálculo de  $t_m$  pode ser efectuado iterativamente, recorrendo à expressão:

$$\exp(-2\sigma t_m/\beta) = \cos(2\sigma t_m) - \sin(2\sigma t_m)/\beta \quad (9.23)$$

### Método gráfico

Este método é mais simples, recorrendo à análise gráfica e mais intuitiva, da expressão:

$$R(t)/R_\infty = 0.5 \{ 1 - \exp(-2\sigma t/\beta) \beta^2 / (1 + \beta^2) - [\cos(2\sigma t) + \beta \sin(2\sigma t)] / (1 + \beta^2) \} \quad (9.24)$$

Esta expressão permite a construção de gráficos onde se relaciona a razão  $R(t)/R_\infty$  com  $\sigma t$  (em radianos), para cada tempestade, à qual está associado um valor de  $\beta$ . Na figura 9.3. representa-se o comportamento de três tempestades hipotéticas distintas, com  $\beta = 0$ ,  $\beta = 1$  e  $\beta = 10$ .

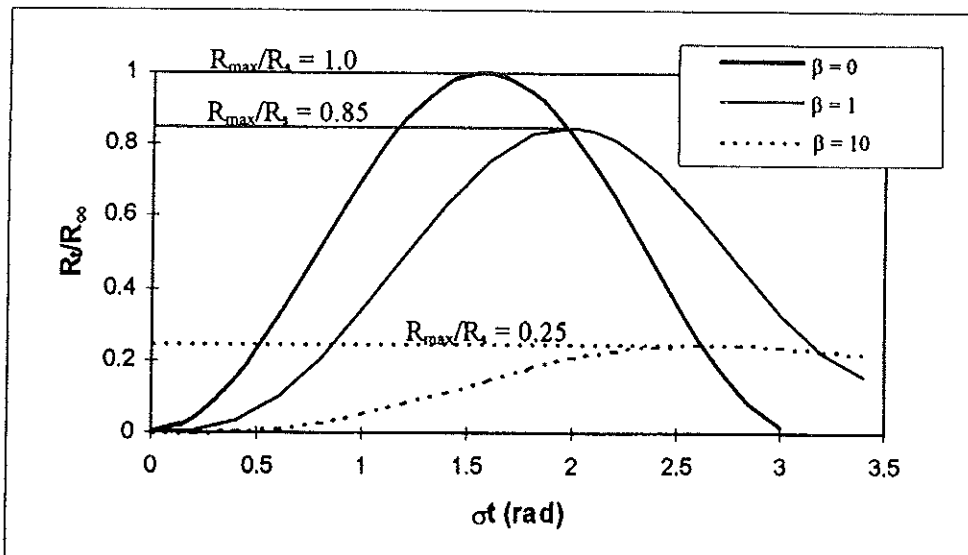


Figura 9.3. Representação gráfica da relação  $R(t)/R_\infty$ , indicando-se o valor de  $R_{max}/R_\infty$  para três casos hipotéticos.

O máximo de erosão de cada tempestade ocorre no ponto de inflexão superior da curva associada a cada valor de  $\beta$ , coincidente com a intercepção da curva  $\beta = x$  com a curva  $\beta = 0$ , sendo fácil de determinar graficamente (ou numericamente, pela construção da curva) qual o valor da razão  $R(t_m)/R_\infty$ , correspondendo  $t_m$  ao tempo a

que ocorre a máxima erosão. Sabendo que  $R(t_m)/R_\infty = y$ , então  $R(t_m) = R_{\max} = yR_\infty$ . Os cálculos dos valores de  $V_{S\max}$  e de  $V_{M\max}$  são efectuados substituindo nas equações 9.16 a 9.19 os valores de  $R_\infty$  por  $R_{\max}$ .

O efeito produzido pela escala temporal de resposta de cada evento extremo é normalmente determinante no valor do recuo e no volume erodido. Kriebel e Dean (1993) referem que um furacão de curta duração produz apenas 20% a 40% da erosão potencial, enquanto que os temporais de duração elevada podem atingir 40% a 90%. Nos exemplos mostrados na figura 9.3. regista-se uma acentuada diferença nos tempos de resposta dos perfis e, conseqüentemente, nas razões obtidas, sendo  $\beta = 1$  correspondente a uma tempestade de longa duração e  $\beta = 10$  a um temporal de curta duração.

#### 9.1.4.2. Análise crítica do modelo

As grandes vantagens deste modelo, relativamente a outros já existentes, expressas pelos próprios autores, são a simplicidade de aplicação do método, a inclusão de forma quantificada da dependência temporal e a possibilidade de poder ser aplicado quer analítica quer numericamente. Neste trabalho, tal como no de Kriebel e Dean (1993), deu-se ênfase à solução analítica. No entanto, para um determinado perfil medido no campo, a máxima resposta potencial da praia pode ser determinada pela simples translação vertical e horizontal do perfil, até atingir o balanço de massa. Outra vantagem do método é o facto de proporcionar um potencial de erosão, que poderá ser importante em termos de análise de sensibilidade costeira.

Por outro lado, o método utiliza parâmetros relativos à agitação e ao nível do mar em conjunto com parâmetros morfológicos e sedimentológicos. Permite, ainda, uma série de soluções possíveis na variação do perfil emerso, possibilitando, por exemplo, testes de galgamento ou de realimentação de praias.

Como contras principais os próprios autores do modelo apontam a simplificação do registo de sobrelevação, correspondendo a uma sobrelevação idealizada, estática. Também as características de agitação enfermam do mesmo problema, visto que a altura na rebentação é assumida como sendo constante durante toda a actuação da tempestade. Este é um pressuposto conservativo, que fornece

estimativas em 10% superiores às que são obtidas com alturas variáveis (Kriebel e Dean, 1993).

O cálculo de  $R_x$  para valores de pico superior de sobrelevação e para a máxima altura de onda poderão, assim, promover a obtenção de resultados sobrestimados relativamente aos reais. Outro factor que pode ajudar a essa sobrestima é o facto do modelo assumir que os contornos superiores do perfil serão erodidos ao longo de todo o evento, quando são apenas activados durante os níveis de água mais elevados.

Para além destes problemas, o modelo não prevê a formação de barras, até porque é quase exclusivamente dedicado às variações morfológicas sub-aéreas. Outra limitação é a não inclusão de variações associadas a níveis de "runup", determinantes no alcance máximo da erosão por tempestades.

A calibração deste modelo ainda não foi efectuada de forma perfeita e extensiva. Ainda que o modelo tenha por base outros já testados para uma série importante de dados de campo, na realidade o método aqui apresentado apenas foi verificado pelos autores para duas condições extremas, um furacão de curta-duração e uma tempestade tropical de longa-duração. Para o furacão, a erosão máxima determinada foi de apenas 24% da erosão potencial, enquanto que para a tempestade foi de 91%. Os valores previstos de recuo, para o furacão, e de volume, para a tempestade, foram relativamente próximos dos verificados. Contudo, o volume de erosão previsto para o furacão foi muito superior (cerca de 3 vezes) ao valor efectivo, o que os autores atribuem em parte à natureza do método, mas também à significativa recuperação pós-temporal registada nos perfis.

## 9.2. VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A modelação que envolva transporte sedimentar não coesivo pode ser considerada como uma "aventura" de elevada dificuldade, onde as discrepâncias de 100% ou mais têm de ser consideradas como aceitáveis (deVriend, 1991).

Esta afirmação obriga a que a aplicação de um determinado método ou modelo a uma zona costeira só deva ser efectuada, com garantias de fiabilidade nos resultados, caso se proceda a uma validação desse modelo utilizando dados de campo. Isto é,

verificando se as estimativas reproduzem resultados dentro de um erro aceitável. Na costa portuguesa têm sido vários os exemplos contrários, de exploração de modelos criados para condições morfológicas e de agitação bem distintas, com obtenção de resultados que não expressam elevado rigor, podendo inclusive induzir em erro o utilizador dos resultados produzidos. Esta necessidade de validação dos métodos a condições específicas das praias portuguesas foi já demonstrada por Ciavola *et al.* (1996, 1997b) relativamente à determinação da deriva longilitoral e por Ferreira (1993) para o cálculo da erosão de praias e dunas. Assim, neste trabalho, os modelos atrás descritos serão aplicados a dois casos concretos, para os quais se possuem registos relativos às tempestades e dados de campo da morfologia das praias, antes e após a actuação dos eventos. Pretende-se, desta forma, aquilatar das capacidades de previsão de cada método, da sua real possibilidade de utilização, dos pontos fracos existentes e das necessidades de melhoria, aferindo o grau de confiança que se pode ter em cada previsão.

As tempestades seleccionadas foram-no por corresponderem às únicas em que existem dados morfológicos anteriores e posteriores à sua actuação, para a zona de estudo, tendo sido possível obter os registos de agitação ao largo e dos marégrafos. Tal facto possibilita uma análise completa e relativamente rigorosa das consequências desses temporais, permitindo validar os métodos.

Por outro lado, as tempestades escolhidas apresentam características distintas, nomeadamente na altura máxima da agitação incidente e, sobretudo, no tempo de duração, o que se traduz em elevadas diferenças no volume de erosão registado. Tal facto, permite verificar a robustez dos modelos de previsão para situações diferentes e complementares.

Na descrição das características e dos efeitos das tempestades englobam-se não apenas os dados de agitação, duração e níveis extremos, mas também as respostas dos perfis de praia, caso a caso.

#### 9.2.1. Tempestade de 24 a 27 de Fevereiro de 1989

Esta tempestade, que assolou a costa oeste portuguesa em finais de Fevereiro de 1989, está descrita do ponto de vista da agitação incidente ao largo, para a Figueira da Foz, em relatório do Instituto Hidrográfico (1989). Durante a tempestade, registou-

se uma altura significativa máxima da onda, ao largo, de 8.83 m, com período significativo associado de 14.9 s. A máxima altura de onda registada atingiu os 14.6 m e o período máximo os 22.5 s. A direcção predominante do temporal, ao largo, variou entre N70°W e N60°W. De acordo com Pires e Pessanha (1986a,b), Carvalho (1992) e Ferreira (1993), o período de retorno correspondente à altura significativa máxima indicada é de cerca de 3 anos. Para a determinação da altura da onda na rebentação recorreu-se à fórmula de Komar e Gaughan (1972), obtendo-se um valor de 10.3 m.

Pela análise da registo maregráfico de Aveiro, determinou-se que a sobrelevação máxima do nível do mar durante a tempestade foi de 0.47 m. Esta sobrelevação excede em pouco o valor de uma sobrelevação muito significativa (Gama *et al.*, 1994a) para a referida localidade (0.42 m), sendo no entanto bastante inferior aos valores máximos de sobrelevação já registados em Aveiro (cerca de 0.8 m). O nível extremo mais elevado (maré + sobrelevação) atingido durante a tempestade foi de 3.53 m ZH, não tendo sido mais elevado por não haver uma coincidência entre a máxima sobrelevação e a máxima maré alta. A análise do maregrama possibilitou, ainda, determinar o tempo de subida ( $t_r$ ) da tempestade em cerca de 45 h, desde o início do temporal até se atingir o nível máximo de sobrelevação. A duração total da tempestade ( $T_D$ ) foi de cerca de 62 h.

O posicionamento do marégrafo de Aveiro, localizado dentro do porto, junto aos molhes de entrada, não permite a obtenção de valores de sobrelevação e de níveis extremos idênticos aos que se terão verificado em praia aberta. No entanto, sendo estes os dados disponíveis e dada a proximidade entre o local de estudo e o marégrafo, utilizar-se-ão os seus valores como correspondentes à melhor aproximação possível.

Relativamente aos perfis utilizados, estes foram obtidos no âmbito do Projecto Atlas dos Ambientes Geológicos de Portugal, do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, tendo sido gentilmente cedidos pelos responsáveis do referido projecto. Os 4 locais levantados na área de estudo situam-se em Praia de Quiaios (PQ), Canto do Marco (CM), Barra de Mira (BM) e Vagueira (V). Os levantamentos topográficos efectuados antes do temporal datam de Junho de 1988 (PQ, CM e V) e de Setembro de 1988 (BM). O facto dos levantamentos se terem efectuado 5 a 8 meses antes da tempestade pode causar erros importantes nesta avaliação. Nomeadamente, porque tal como verificado no capítulo 7 desta dissertação, as variações existentes nos meses de Inverno podem ser

significativas. A inexistência de dados morfológicos recolhidos em data mais próxima do evento não permite um rigor extremo nesta validação, possibilitando no entanto a obtenção de indicadores importantes. Os levantamentos após a tempestade foram efectuados nos primeiros dias de Março de 1989, pouco tempo após a tempestade e em situação onde parece não ter ocorrido recuperação das praias, visto não se ter verificado formação de bermas. Apenas em Barra de Mira se registou alguma acreção na parte inferior da face da praia, que pode estar relacionada com o início de recuperação da praia. Os perfis analisados correspondem apenas à parte emersa da praia, raramente alcançando cotas inferiores a 3 m ZH. A continuidade dos perfis até aos 2 m ZH foi obtida por extrapolação, utilizando o declive médio entre os pontos da face da praia imediatamente superiores. Para o largo, os perfis foram continuados tendo por base a batimetria média dos levantamentos hidrográficos de 1987 e 1990, para as zonas circundantes aos locais utilizados (Ferreira, 1993). Na figura 9.4. é possível visualizar os perfis utilizados para a análise do efeito desta tempestade.

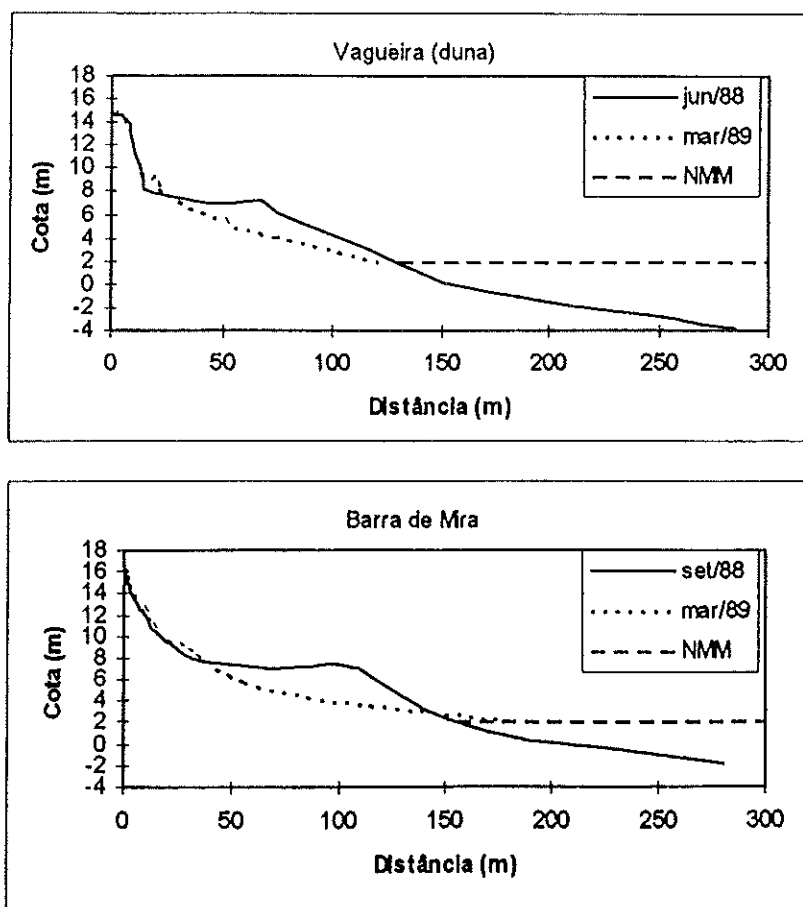


Figura 9.4. Perfis ante e pós-tempestade de Fevereiro de 1989 (cotas referidas ao ZH) (continua).

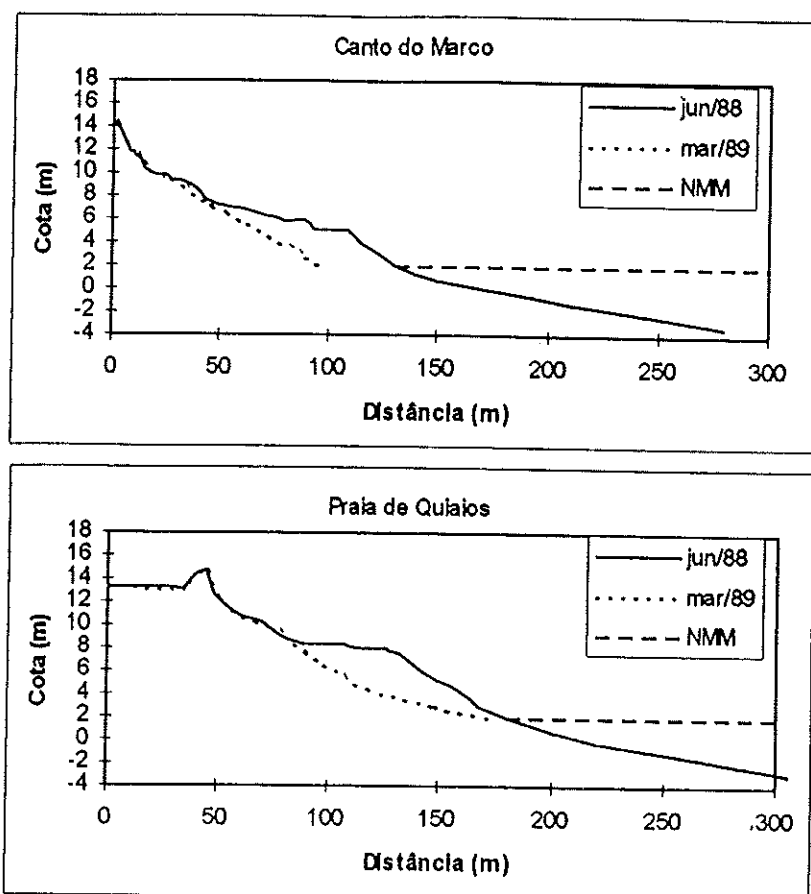


Figura 9.4. Perfis ante e pós-tempestade de Fevereiro de 1989 (cotas referidas ao ZH).

#### 9.2.1.1. Modelo MSBWT

A aplicação original deste modelo utiliza um valor de nível máximo atingido acima do Datum Vertical Geodésico Nacional dos EUA, de acordo com Balsillie (1997), correspondente ao nível médio do mar. Em grande parte dos casos estudados pelo autor do modelo, a sobrelevação induzida pelos eventos, nomeadamente pelos furacões, foi superior à amplitude de maré ocorrida. Nestes casos, a importância relativa da maré é pequena quando comparada com a importância da sobrelevação meteorológica atingida. Os níveis máximos utilizados por Balsillie variaram entre 1.13 m e 3.86 m acima do nível de referência, sendo vários os valores superiores a 3 m. Estes níveis extremos são muito difíceis de obter na costa oeste portuguesa utilizando como datum vertical o NMM, dada a menor importância relativa das sobrelevações meteorológicas na nossa costa. Assim, na tentativa inicial de aplicação do método, utilizando níveis extremos acima do NMM, os valores de erosão obtidos foram notoriamente inferiores aos verificados. Optou-se, então, por conferir uma maior importância ao desenvolvimento da maré, recorrendo ao Zero Hidrográfico como nível

de referência vertical e considerando o nível extremo (S') como o valor máximo atingido pelo nível do mar (maré + sobrelevação) acima do ZH. Assim, para o temporal de Fevereiro de 1989 utilizou-se  $S' = 3.53$  m, sendo o tempo de subida de 45 h (162000 s). Substituindo estes valores nas equações 9.5 a 9.8, obtiveram-se as previsões dos volumes médios e máximos erodidos acima do NMM e do nível extremo atingido na tempestade (S'), que estão expressos na tabela 9.1.

**Tabela 9.1.** Volumes de erosão previstos pelo modelo MSBWT para a tempestade de Fevereiro de 1989.

Modelo	$Q_{e,avg}$ (m <sup>3</sup> /m)	$Q_{e,max}$ (m <sup>3</sup> /m)	$Q_{e',avg}$ (m <sup>3</sup> /m)	$Q_{e',max}$ (m <sup>3</sup> /m)
MSBWT	170.0	373.6	83.6	183.7

Pela comparação entre os perfis dos quatro locais analisados (figura 9.4.), determinou-se a diferença volumétrica entre os perfis iniciais e pós-tempestade, tendo-se obtido os volumes de erosão, para cada praia, acima do NMM e de S', bem como os volumes médios para a globalidade da área de estudo, tomando os locais analisados como representativos da mesma. A maior erosão observada foi assumida como correspondente ao máximo volume de erosão causado pela tempestade, ainda que tal não seja obrigatoriamente correcto. Os valores obtidos estão expressos na tabela 9.2., sendo de referir a proximidade em valor, por vezes, dos volumes de erosão acima dos dois níveis de referência utilizados. Tal deve-se ao facto de grande parte da erosão verificada se ter efectuado a níveis elevados da praia emersa.

**Tabela 9.2.** Volumes (m<sup>3</sup>/m) de erosão das praias analisadas, para a tempestade de Fevereiro de 1989.

	PQ	CM	BM	V	Média
Acima do NMM	210	163	208	139	180
Acima de S'	183	109	201	116	152

Na tabela 9.3. apresenta-se uma comparação entre as previsões e os volumes reais determinados, incluindo as diferenças percentuais entre eles. Da análise da tabela 9.3. ressalta a concordância entre os valores médios previstos e obtidos acima do NMM, bem como entre os valores máximos de erosão acima de S'. É também notório o desajuste existente para os valores relativos ao volume médio acima de S' e, sobretudo, para o volume máximo acima do NMM, com uma sobrestima notória relativamente ao observado.

Tabela 9.3. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão medidos e previstos pelo modelo MSBWT, para a tempestade de Fevereiro de 1989.

	$Q_{eavg}$ modelo	$Q_{eavg}$ campo	Diferenças (%)	$Q_{emax}$ modelo	$Q_{emax}$ campo	Diferenças (%)
Acima do NMM	170.0	180	-5.6	373.6	210	+77.9
	$Q_{e'avg}$ modelo	$Q_{e'avg}$ campo	Diferenças (%)	$Q_{e'max}$ modelo	$Q_{e'max}$ campo	Diferenças (%)
Acima de S'	83.6	152	-45.0	183.7	201	-8.6

Utilizando o valor estimado pelo método para o volume médio acima do NMM e as indicações de Balsillie (1997) para geração de um perfil pós-tempestade, procedeu-se à determinação do perfil final previsto. Na figura 9.5., observa-se a previsão obtida para todas as praias analisadas, sendo visível que a utilização de um pendor 1:1 acima do valor de S' não permite a obtenção de resultados satisfatórios, dado não se terem originado escarpas tão notórias nos perfis, nem às cotas determinadas, prolongando-se o perfil de erosão mais para o interior.

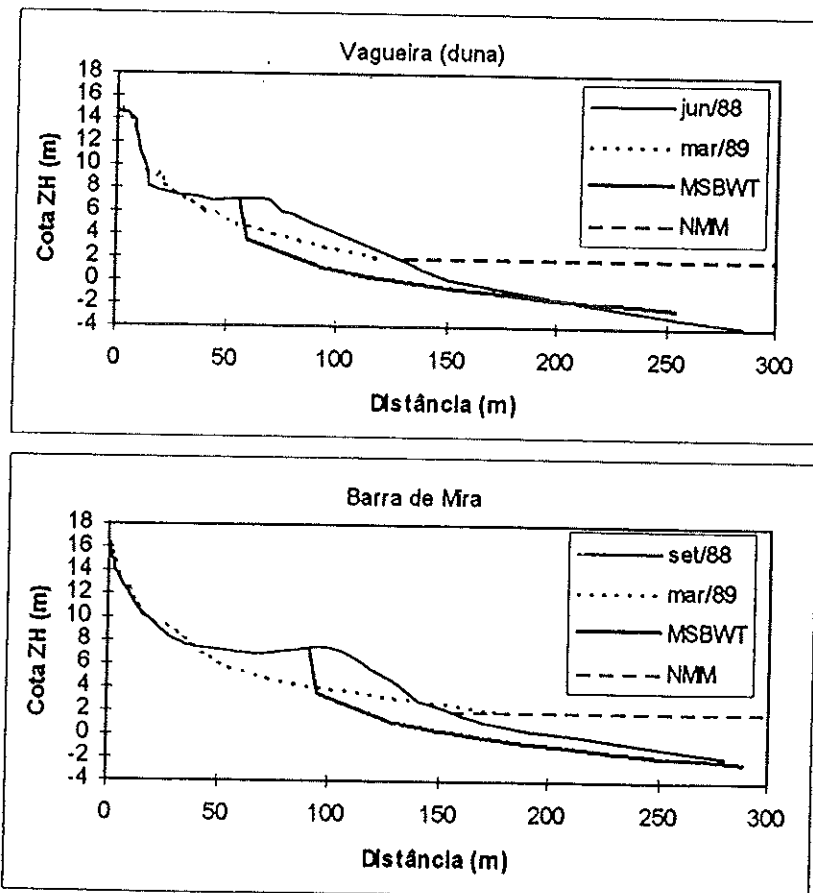


Figura 9.5. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo MSBWT e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Fevereiro de 1989. (continua)

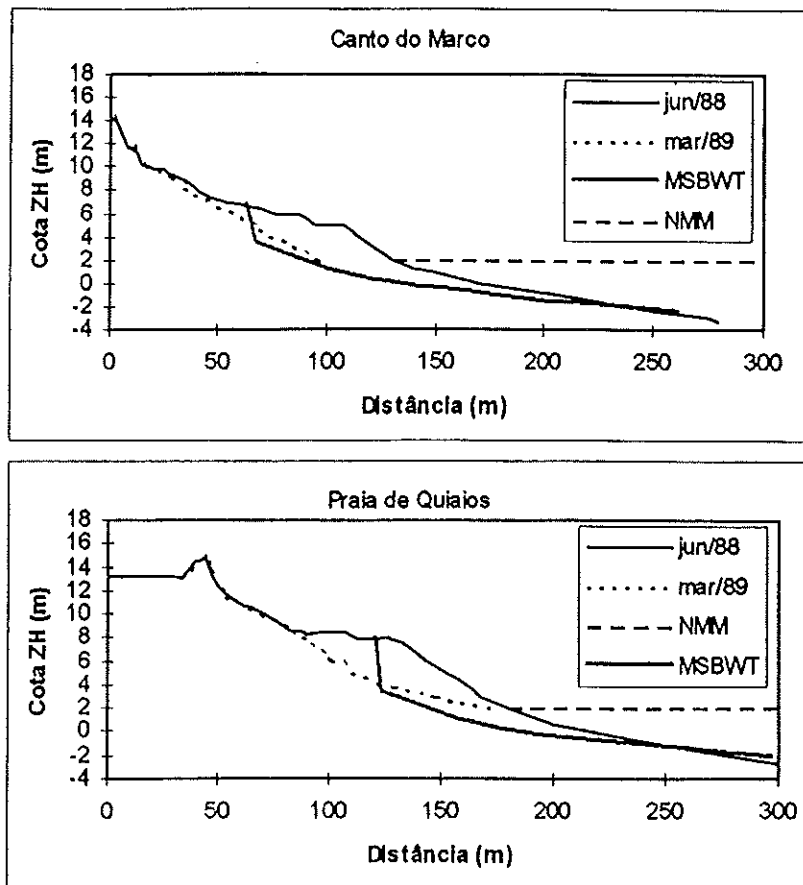


Figura 9.5. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo MSBWT e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Fevereiro de 1989.

#### 9.2.1.2. Modelo de convolução

Para a utilização do modelo de Kriebel e Dean (1993) procedeu-se a uma esquematização dos perfis iniciais das várias praias analisadas, determinando-se o declive da face da praia ( $\tan\beta$ ), a altura da berma acima do NMM (B), a largura da berma (W) e a altura da duna (D). A determinação dos vários parâmetros foi dificultada por alguns factores. Nomeadamente: a inexistência de bermas horizontais, contrariamente ao pressuposto pelo modelo; a existência de mais do que uma berma no mesmo perfil, em alguns locais; a ocorrência de alta praia, na transição entre a berma e a duna, que o modelo não contempla; e a presença de vários declives na face da duna. Os parâmetros foram calculados por forma a manter a volumetria global do perfil e a alterar ao mínimo as suas características.

Os valores de  $\tan\beta$ , B, W e D obtidos encontram-se na tabela 9.4., conjuntamente com os dados que foram utilizados para caracterizar o temporal de Fevereiro de 1989.

**Tabela 9.4.** Dados morfológicos e da tempestade necessários para a aplicação do modelo de convolução à tempestade de Fevereiro de 1989, na área de estudo.

Dados dos perfis	$\tan\beta$	B (m)	W (m)	D (m)
PQ	0.12	6.6	58	6.1
CM	0.12	5.0	76	7.1
BM	0.10	5.8	86.4	8.4
V	0.08	5.3	50.6	7.2
Dados da tempestade	S' (m)	H <sub>b</sub> (m)	T <sub>D</sub> (h)	
	1.53	10.3	62	

Para o cálculo dos recuos potenciais foi necessário determinar o valor do parâmetro A de Dean (1977), tendo-se recorrido à equação 9.12, obtendo-se um valor de  $A = 0.18$ , para um diâmetro médio do sedimento da face da praia de 0.5 mm, a que corresponde uma velocidade de sedimentação de 0.07 m/s. Ferreira *et al.* (1995), tinham já determinado o valor médio de A, empiricamente, para a área de estudo, através do ajuste do perfil médio da parte superior da praia submersa à curva definida pela equação 9.11, obtendo um valor de  $A = 0.18$ . Desta forma, este foi o valor adoptado como representativo da área de estudo, sendo, como tal, utilizado. Foi igualmente necessário determinar o valor de  $x_0$ , ainda que este possa ser negligenciado de acordo com Kriebel e Dean (1993). Ferreira *et al.* (1995) verificaram que o valor de  $x_0$ , para a área de estudo era próximo de 1 m, pelo que a sua inclusão não alterava os resultados de forma apreciável. Neste trabalho, utilizando  $A = 0.18$  e valores de  $\tan\beta$  entre 0.08 e 0.12, verificou-se que  $x_0$  pode variar entre 0.5 m e 1.7 m, não afectando os resultados finais, visto que os valores de  $x_b$  são duas a três ordens de grandeza superiores.

Após a determinação de  $x_0$ ,  $x_b$ ,  $d_b$  e A é possível calcular  $R_{\infty D}$  (recoo potencial dunar), recorrendo à equação 9.13. No entanto, todos os valores de  $R_{\infty D}$  obtidos foram negativos, indicando que para este temporal o modelo não previu recoo dunar, para qualquer das praias. Assim, procedeu-se à determinação do recoo potencial da berma ( $R_{\infty B}$ ). Como referido, estes valores podem ser distantes dos recuos efectivos, dependendo tal facto do tempo de resposta do perfil ao temporal e da duração deste. Foi, então, necessário calcular o valor da razão  $R_{\max}/R_{\infty}$ , para cada perfil, tendo como base o parâmetro  $\beta$ . Na figura 9.6. apresentam-se os gráficos relativos aos valores de  $\beta$  determinados para este temporal, associados a cada perfil, sendo possível verificar os valores da relação  $R_{\max}/R_{\infty}$ , caso a caso.

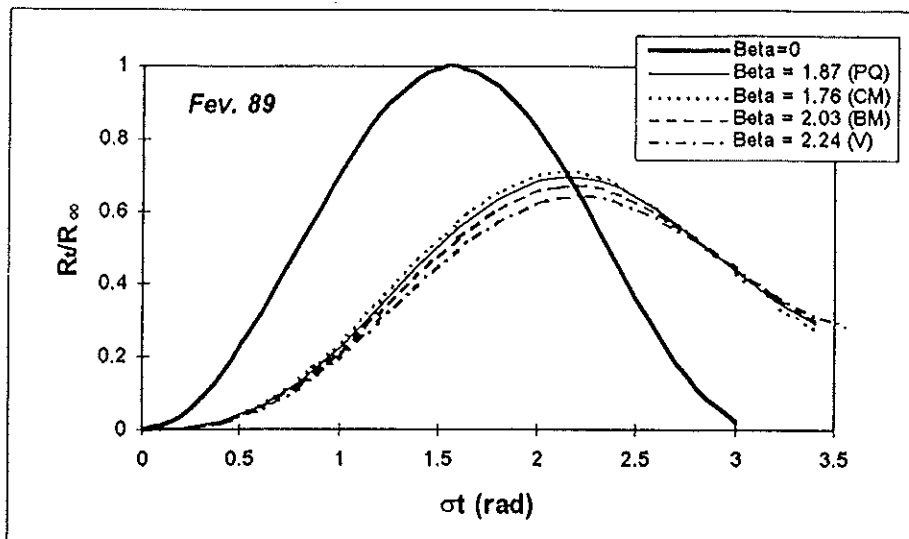


Figura 9.6. Representação da variação do tempo de resposta de cada perfil para o temporal de Fevereiro de 1989, para cada perfil considerado.

Os valores de  $R_{\infty B}$ , da relação  $R_{\max}/R_{\infty}$ , de  $R_{\max B}$  e dos volumes teoricamente erodidos, em cada praia, encontram-se na tabela 9.5. São também indicados os valores médios para a área em análise, admitindo que os quatro perfis são representativos.

Tabela 9.5. Valores de recuo e volume estimados pelo método de convolução para o temporal de Fevereiro de 1989, para diferentes locais.

Praia	$R_{\infty B}$ (m)	$R_{\max}/R_{\infty}$ (m)	$R_{\max B}$ (m)	$V_{S\max}$ (m <sup>3</sup> /m)	$V_{M\max}$ (m <sup>3</sup> /m)
PQ	41.7	0.695	29.0	147	186
CM	45.0	0.71	32.0	117	161
BM	41.8	0.67	28.0	120	159
V	40.0	0.645	25.8	97	136
Médias	42.1	0.68	28.7	120	160.5

Na tabela 9.6. comparam-se os volumes de erosão previstos e verificados, acima do NMM e de  $S'$ , indicando-se as diferenças entre ambos, perfil a perfil.

Tabela 9.6. Comparação entre volumes (m<sup>3</sup>/m) de erosão verificados e previstos pelo modelo de convolução, para a tempestade de Fevereiro de 1989, em diferentes locais.

Praias	$V_{S\max}$ previsto (m <sup>3</sup> /m)	$V_{S\max}$ campo (m <sup>3</sup> /m)	Diferença (%)	$V_{M\max}$ previsto (m <sup>3</sup> /m)	$V_{M\max}$ campo (m <sup>3</sup> /m)	Diferença (%)
PQ	147	182	-19.2	186	210	-11.4
CM	117	109	+7.3	161	163	-1.2
BM	120	201	-40.3	159	208	-23.6
V	97	116	-16.4	136	139	-2.2
Médias	120	152	-21.0	160.5	180	-10.8

A análise da tabela permite verificar o ajuste existente entre previsões e dados de campo, ainda que as previsões sejam genericamente inferiores aos valores de

campo. Existe maior concordância entre os valores acima do NMM do que nos valores acima de S'. Constatase, igualmente, que as diferenças médias são relativamente pequenas, ainda que praia a praia possam atingir máximos de 40%. De forma geral, o método conseguiu prever o comportamento de cada perfil, indicando maior erosão nos perfis que mostraram maior ablação sedimentar, sobretudo para  $V_{Mmax}$ . Assim, parece ser possível a utilização do método para comportamentos médios e praia a praia.

A figura 9.7. representa os perfis reais e os previstos pelo método, registando-se um ajuste razoável entre ambos. A maior imprecisão dos perfis previstos consiste na utilização do declive da face da praia do perfil inicial, acima de S', o que não corresponde à realidade, visto que o pendor da praia diminui durante tempestades. Seria aconselhável adoptar um declive final diferente, implicando valores de  $R_{max}$  variáveis ao longo da face da praia e, como tal, novas fórmulas de cálculo de  $R_{\infty}$ .

Por outro lado, o modelo não foi capaz de prever acreção acima do NMM, que ocorreu em Barra de Mira. Desta forma, ainda que os volumes globais determinados tenham sido concordantes com os registados no terreno, os valores de  $R_{max}$  podem ser, em alguns casos, relativamente diferentes, como é exemplo o perfil de Barra de Mira.

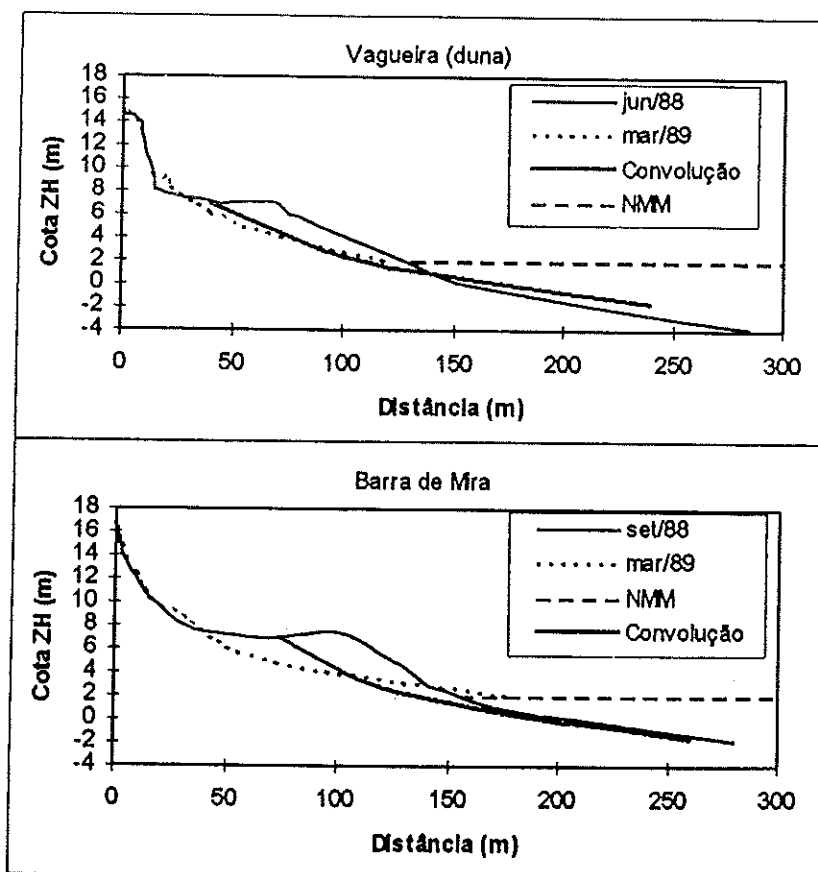


Figura 9.7. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo de convolução e os perfis obtidos no campo, para o temporal de Fevereiro de 1989 (continua).

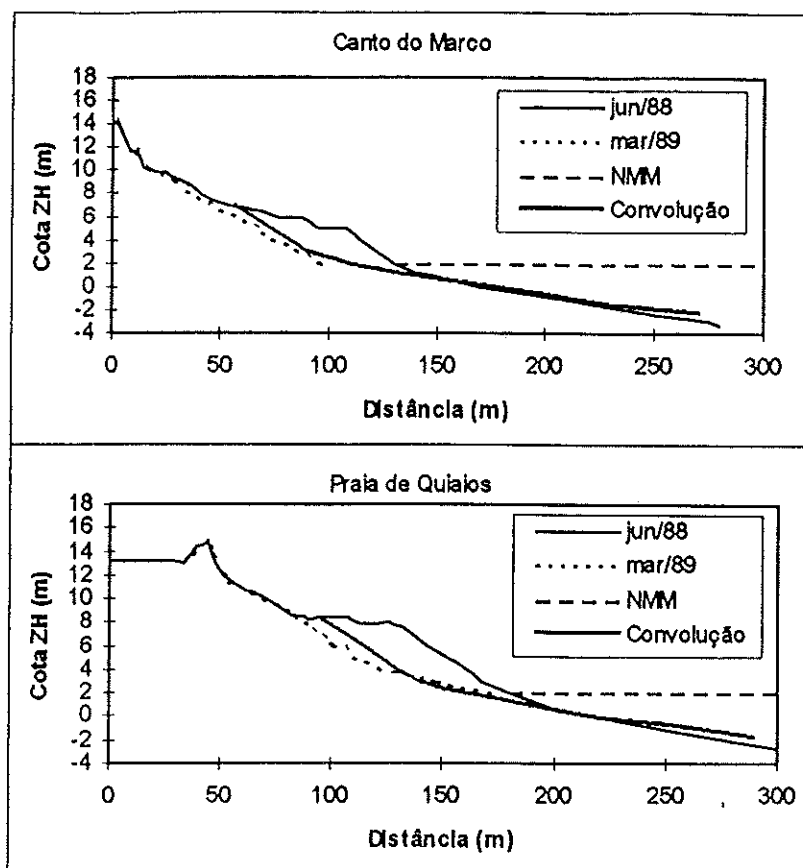


Figura 9.7. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo de convolução e os perfis obtidos no campo, para o temporal de Fevereiro de 1989.

### 9.2.2. Tempestade de 16 de Dezembro de 1992

A tempestade de curta duração do dia 16 de Dezembro de 1992 coincidiu com o último dia da campanha Tocha 92, onde se obtiveram dados diários de evolução do perfil de praia emersa em cinco locais, distribuídos por 100 m de costa. A casualidade permitiu, assim, a obtenção de dados fidedignos relativos a uma condição extrema, possuindo-se cinco perfis iniciais (15 de Dezembro) e cinco perfis pós-tempestade (16 de Dezembro, 13h45m às 14h30m).

Os dados de agitação na rebentação foram estimados visualmente durante a manhã do dia 16, na maré alta, registando-se um valor de 6.5 m de altura da onda para a primeira linha de rebentação. Os registos da bóia-ondógrafo da Figueira da Foz (Instituto Hidrográfico, 1993) indicam altura significativa ao largo coincidente com a maré alta entre 6.60 m e 6.92 m. O período de retorno de um temporal com esta gama de alturas significativas é ligeiramente inferior a 1 ano, de acordo com os dados expressos na tabela 3.4., baseados em Ferreira (1993).

A análise dos registos dos maregramas de Aveiro, para este dia, permitiu concluir que o tempo de subida terá sido de 5.3 h e o tempo de duração da tempestade de 11.7 h, tendo-se registado uma sobrelevação máxima de apenas 0.26 m, ligeiramente abaixo do valor de sobrelevação significativa (0.31 m) indicado por Gama *et al.* (1994a) para Aveiro. O nível extremo resultante da conjugação da maré com a sobrelevação atingiu os 3.37 m.

#### 9.2.2.1. Modelo MSBWT

A utilização conjunta de um nível extremo de 3.37 m e de um tempo de subida de 19080 s, nas equações 9.5 a 9.8, permitiu determinar os volumes de erosão previstos, que estão expressos na tabela 9.7.

Tabela 9.7. Volumes de erosão previstos pelo modelo MSBWT para a tempestade de Dezembro de 1992.

Modelo	$Q_{e,avg}$ (m <sup>3</sup> /m)	$Q_{e,max}$ (m <sup>3</sup> /m)	$Q_{e,avg}$ (m <sup>3</sup> /m)	$Q_{e,max}$ (m <sup>3</sup> /m)
MSBWT	30.7	67.5	15.1	33.2

A comparação entre os perfis obtidos nas tardes dos dias 15 e 16 de Dezembro de 1992 permitiu determinar as variações volumétricas entre eles, acima do NMM e do valor extremo atingido, S'. Refere-se que os volumes de erosão acima do NMM aqui determinados não são coincidentes com os expressos na tabela 8.5. porque apenas se contabilizou a erosão total, enquanto que os valores da tabela 8.5. utilizam um balanço entre a erosão e a acreção ocorrida acima do NMM. Desta forma, os valores só são coincidentes nos locais onde não ocorreu qualquer acreção acima do NMM. Tal só se verificou no perfil 50S. Os volumes obtidos estão expressos na tabela 9.8..

Tabela 9.8. Volumes (m<sup>3</sup>/m) de erosão das praias analisadas, para a tempestade de Dezembro de 1992.

	Perfil 50S	Perfil 25S	Perfil 0	Perfil 25N	Perfil 50N	Média
Acima do NMM	27.8	14.4	14.5	21.4	22.6	20.1
Acima do S'	24.1	13.9	13.4	19.5	21.7	18.5

Também para esta tempestade se verificou que os volumes erodidos acima do NMM e de S' não variaram muito, devido à existência de erosão apenas na parte superior da face da praia, com alguma acumulação na parte inferior. Este tipo de

comportamento não é previsto pelo modelo, visto que este não pressupõe existência de acreção acima do NMM. A comparação entre previsões e dados de campo está expressa na tabela 9.9..

Tabela 9.9. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão verificados e previstos pelo modelo MSBWT, para a tempestade de Dezembro de 1992.

	$Q_{e,avg}$ modelo	$Q_{e,avg}$ campo	Diferenças (%)	$Q_{e,max}$ modelo	$Q_{e,max}$ campo	Diferenças (%)
Acima do NMM	30.7	20.1	+52.7	67.5	27.8	+142.8
	$Q_{e',avg}$ modelo	$Q_{e',avg}$ campo	Diferenças (%)	$Q_{e',max}$ modelo	$Q_{e',max}$ campo	Diferenças (%)
Acima de S'	15.1	18.5	-18.4	33.2	24.1	+37.8

A aplicação do modelo MSBWT à tempestade de Dezembro de 1992 pauta-se por uma previsão de erosão excessiva relativamente à verificada, com excepção do valor médio registado acima de S'. No entanto, apesar das elevadas diferenças percentuais, os desvios absolutos situam-se entre  $-3.4 m^3/m$  e  $+10.6 m^3/m$ , o que se pode tomar como aceitável, com excepção da previsão para o volume máximo acima do NMM, onde a diferença é mais elevada ( $+39.7 m^3/m$ ).

Na figura 9.8. apresentam-se dois exemplos de aplicação do perfil teórico determinados pelo modelo, comparando-se com o perfil final registado em Tocha 0 e em Tocha 50S. Verifica-se uma diferença importante entre o perfil previsto e o observado, devido à representação de um pendor 1:1 acima do nível S' e, também, à impossibilidade do método em prever acreção acima do NMM.

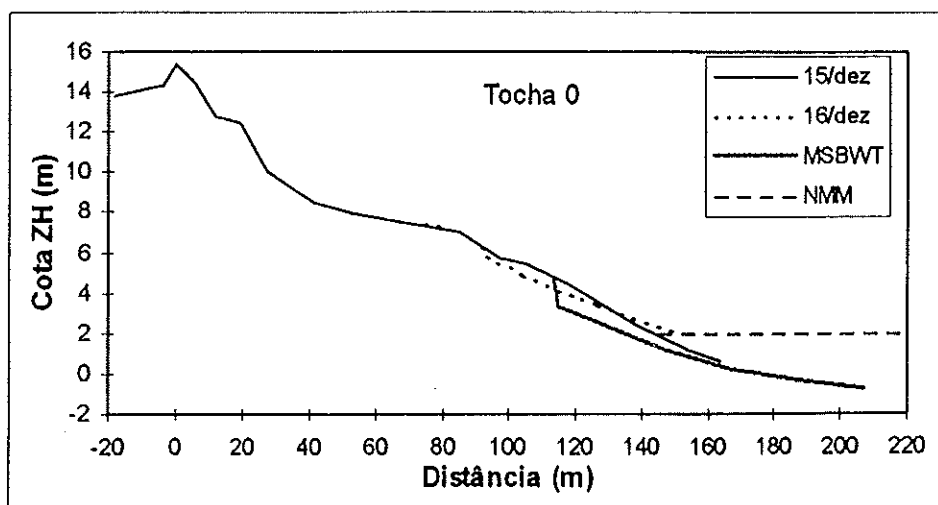


Figura 9.8. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade do modelo MSBWT e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Dezembro de 1992. (continua)

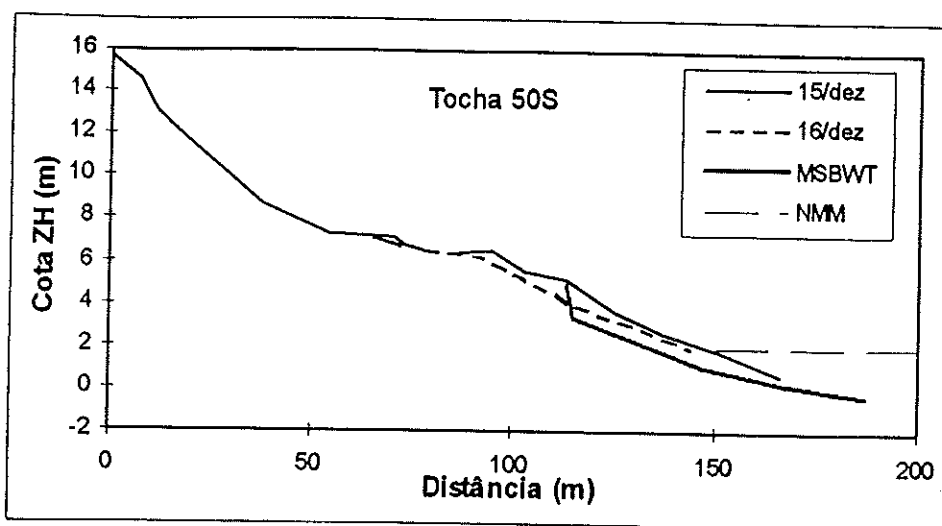


Figura 9.8. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade do modelo MSBWT e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Dezembro de 1992.

#### 9.2.2.2. Modelo de convolução

Tal como para o estudo do temporal anterior, também neste foi necessário proceder à esquematização dos perfis de praia, existindo o mesmo tipo de problemas (ex.: bermas irregulares e não horizontais, existência de alta praia). Um problema adicional foi a presença de uma segunda berma, formada pela agitação menos energética dos dias anteriores à tempestade. Por se ter verificado, no campo, que a erosão tinha afectado sobretudo as bermas mais pequenas, levando à sua total ablação, determinaram-se apenas os valores de  $\tan\beta$  e de B, não sendo necessários W e D. O valor de B utilizado corresponde à elevação da crista das bermas pequenas ou secundárias, em cada perfil, dado terem sido estas o objecto preferencial da erosão. Não se utilizou um perfil total, com  $\tan\beta$ , B, W e D, por não se pressupor a existência de erosão total ou significativa da berma mais elevada e, muito menos, de ablação dunar por esta tempestade de curta duração. Os valores obtidos para as variáveis supracitadas, bem como os dados da tempestade, são apresentados na tabela 9.10..

Tabela 9.10. Dados morfológicos e da tempestade necessários para a aplicação do modelo de convolução à tempestade de Dezembro de 1992.

Dados dos perfis	$\tan\beta$	B (m)	
Tocha 50S	0.09	3.1	
Tocha 25S	0.08	3.2	
Tocha 0	0.08	3.5	
Tocha 25N	0.12	3.0	
Tocha 50N	0.11	3.5	
Dados da tempestade	$S'$ (m)	$H_b$ (m)	$T_d$ (h)
	1.53	10.3	62

O valor de A utilizado foi de 0.18, tendo  $x_0$  sido calculado de acordo com o valor de  $\tan\beta$  de cada perfil e variado entre 0.5 m e 1.7 m.

Calcularam-se os recuos potenciais da berma para o temporal ( $R_{\infty B}$ ) e os valores de  $\beta$ , tendo estes sido bastante superiores aos da tempestade anterior, indicando que as praias não tiveram tempo suficiente para atingirem um estado próximo do equilíbrio (figura 9.9.). Assim, as razões  $R_{\max}/R_{\infty}$  obtidas foram relativamente baixas, indicando valores de  $R_{\max}$  cerca de 65% a 75% inferiores ao recuo potencial.

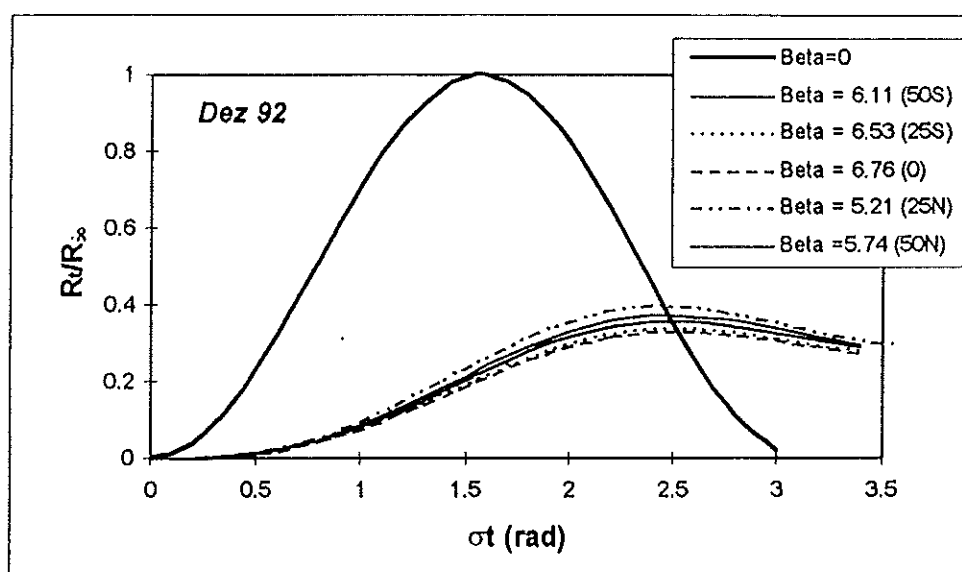


Figura 9.9. Representação da variação do tempo de resposta de cada perfil para o temporal de Dezembro de 1992.

Os valores calculados de  $R_{\infty B}$ ,  $R_{\max}/R_{\infty}$ ,  $V_{S\max}$ , e  $V_{M\max}$ , para cada perfil, estão expressos na tabela 9.11., onde se indicam também os valores médios relativos à globalidade dos cinco perfis analisados.

Tabela 9.11. Valores de recuo e volume estimados pelo método de convolução para a tempestade de Dezembro de 1992.

Praia	$R_{\infty B}$ (m)	$R_{\max}/R_{\infty}$ (m)	$R_{\max B}$ (m)	$V_{S\max}$ (m <sup>3</sup> /m)	$V_{M\max}$ (m <sup>3</sup> /m)
Tocha 50S	28.1	0.26	7.3	12.7	21.6
Tocha 25S	26.7	0.255	6.8	12.4	22.0
Tocha 0	26.0	0.25	6.5	13.9	23.0
Tocha 25N	31.9	0.335	10.7	17.4	28.3
Tocha 50N	29.4	0.31	9.1	19.5	29.0
Médias	28.4	0.28	8.1	15.2	24.8

Verifica-se, nesta aplicação, uma diferença de recuos e de volumes

relativamente pequena entre os vários perfis, como seria de esperar, visto todos eles terem sido realizados em 100 m de costa e, como tal, possuírem características genericamente semelhantes. Na tabela 9.12. comparam-se os volumes estimados com as variações volumétricas efectivas, obtidas no campo, indicando-se as variações perfil a perfil e as respectivas médias.

Tabela 9.12. Comparação entre volumes ( $m^3/m$ ) de erosão verificados e previstos pelo modelo de convolução, para o temporal de Dezembro de 1992.

Praias	$V_{Smax}$ previsto ( $m^3/m$ )	$V_{Smax}$ campo ( $m^3/m$ )	Diferença (%)	$V_{Mmax}$ previsto ( $m^3/m$ )	$V_{Mmax}$ campo ( $m^3/m$ )	Diferença (%)
Tocha 50S	12.7	24.1	-47.3	21.6	27.8	-22.3
Tocha 25S	12.4	13.9	-10.8	22.0	14.4	+52.8
Tocha 0	13.9	13.4	+3.7	23.0	14.5	+58.6
Tocha 25N	17.4	19.5	-10.8	28.3	21.4	+32.2
Tocha 50N	19.5	21.7	-10.1	29.0	22.6	+28.3
Médias	15.2	18.5	-17.8	24.8	20.1	+23.4

A comparação entre valores previstos e observados permite verificar uma subestima média relativa aos volumes acima de S' e uma sobrestima média para os valores previstos acima do NMM. Os valores obtidos são na globalidade satisfatórios, sendo os desvios médios aceitáveis, ainda que alguns desvios pontuais atinjam valores da ordem dos 50% a 60%. No entanto, dada a pouco intensa erosão promovida pelo evento, em termos de volumetria absoluta os desvios podem considerar-se como relativamente pequenos (entre  $0.5 m^3/m$  e  $8.5 m^3/m$ ). Também neste caso o método consegue prever correctamente as variações perfil a perfil, ainda que com a excepção do perfil 50S. Esta excepção, e a menor diferença registada pelo método entre os volumes erodidos nos perfis 25S e 0 relativamente a 25N e 50N, devem-se a uma relativa incapacidade do método em incorporar variações longilitorais de pequena escala, tais como "beach cusps". Efectivamente, a variação do volume de erosão real entre perfis deveu-se, em grande parte, à sua posição relativamente à crista ou à cava destas formas, havendo maior erosão nas cristas do que nas cavas. O método consegue, em parte, estimar essas variações, visto incorporar o declive inicial da face da praia ( $\tan\beta$ ), sendo este geralmente mais elevado em cristas do que em cavas de "beach cusps". Contudo, apesar desta aproximação, a diferença registada no campo foi superior à prevista pelo método.

Na figura 9.10. podem observar-se dois exemplos do perfil de erosão

produzido pelo modelo de convolução, sendo visível o bom ajuste nas duas situações. No entanto, o prolongamento do perfil para valores superiores a B é incorrecto, visto que produz volumes de erosão maiores dos que se calcularam e efectivamente registaram, dada a ocorrência de uma berma superior não incorporada nesta aplicação do modelo. Assim, o perfil que o modelo efectivamente prevê deveria ser truncado na parte superior, a uma cota igual ao valor de B utilizado, por forma a manter os volumes calculados. Tal não se efectuou nesta representação por ser irreal relativamente às condições de campo, visto não ter ocorrido formação de escarpa. Desta forma, os perfis obtidos e apresentados, ainda que mais ajustados à realidade, possuem uma volumetria ligeiramente diferente da estimada pelo método.

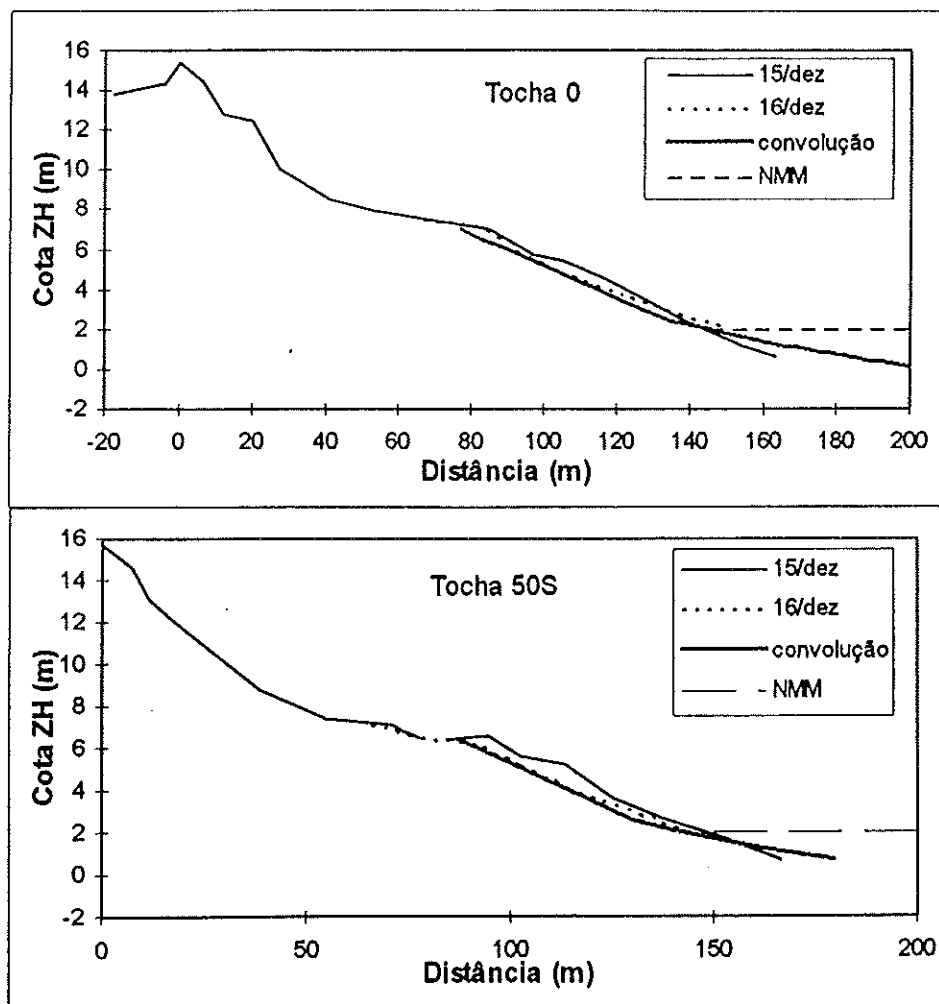


Figura 9.10. Representação comparada entre os perfis pós-tempestade gerados pelo modelo de convolução e os perfis obtidos no campo, para a tempestade de Dezembro de 1992.

### 9.2.3. Avaliação global dos modelos

Antes de iniciar a avaliação de cada modelo, importa estabelecer uma

comparação inicial entre os resultados dos modelos, nomeadamente entre os volumes médios calculados. A análise comparada entre previsões de volumes médios acima do NMM ou do nível de máxima sobrelevação, permite verificar que os desvios entre modelos variaram de -30% a +23.8%, com um desvio médio, em módulo, de 15% (tabela 9.13.). Observou-se, também, que o volume médio calculado acima do NMM tende a ser superior no modelo MSBWT, enquanto que o volume médio calculado acima de S' é superior para o modelo de convolução. Contudo, de forma genérica, para os casos analisados, os volumes médios previstos pelos modelos não apresentam diferenças muito acentuadas entre si.

Tabela 9.13. Comparação de previsão de volumes médios ( $m^3/m$ ), entre modelos.

	$Q_{eavx}$	$V_{Mmax}$	Diferença (%)	$Q_{e'avx}$	$V_{Smax}$	Diferença (%)
Fev 89	170	160.5	+5.9	84	120	-30.0
Dez 92	30.7	24.8	+23.8	15.1	15.2	-0.7
Médias			-14.9			-15.4

### 9.2.3.1 Modelo MSBWT

O modelo MSBWT permitiu a obtenção de valores médios de erosão acima do NMM relativamente próximos dos observados pela análise de campo, com variações absolutas da ordem dos  $10 m^3/m$ . Em termos percentuais, tal correspondeu a desvios de -5.6% e de +52.7%, respectivamente para os temporais de Fevereiro de 1989 e de Dezembro de 1992.

Relativamente aos valores máximos de erosão previstos pelos método, acima do NMM, estes foram bastante superiores aos observados (desvios de 78% e de 143%), não parecendo adequados à área costeira em causa. Sendo certo que apenas se analisaram alguns perfis para cada tempestade, não havendo uma avaliação total da área, não parece mesmo assim credível que se verifique uma diferença tão acentuada na resposta dos diferentes locais pertencentes ao sector costeiro Aveiro - Cabo Mondego, que permita atingir os níveis máximos de erosão previstos.

Por forma a minimizar este problema de previsão, estabeleceu-se uma relação que permite avaliar qual a erosão máxima atribuível a um determinado temporal, tendo por base a erosão média. Para tal, calculou-se o valor da razão entre volumes máximos e médios observados, quer acima do NMM, quer superiores ao nível máximo de

sobreelevação  $S'$  ( $Q_{e\max}/Q_{e\text{avg}}$  e  $Q_{e'\max}/Q_{e'\text{avg}}$ ). As razões obtidas para os valores de campo variaram entre 1.16 e 1.39, apresentando um valor médio de 1.3. Assim, face aos dados existentes, será de esperar que, em média, o volume máximo de erosão seja 1.3 vezes superior ao volume médio observado, ainda que em casos específicos possa ultrapassar esse valor. Registe-se que esta relação é de 2.2, para as previsões do modelo MSBWT.

Como referido anteriormente, a representação do perfil de erosão indicado pelo método peca pela utilização de um pendor 1:1 acima do nível de  $S'$ . Por forma a obviar este problema e a aumentar a representatividade do perfil, introduziram-se algumas alterações na sua representação. Assim, o declive uniforme da face da praia deverá ser prolongado até ao nível de máximo "runup", calculado de acordo com a equação 6.15. Esse declive corresponde ao declive médio determinado para a face da praia em condições de erosão, que para a média dos perfis analisados neste trabalho foi de 0.07. Caso seja necessário prolongar o perfil acima do nível de máximo "runup", então utiliza-se o referido pendor 1:1, definindo uma escarpa na berma ou uma arriba talhada na duna. Na figura 9.11. é possível observar dois exemplos de aplicação do perfil modificado, a duas das praias analisadas, uma para cada tempestade, comparando-se com o perfil inicialmente proposto pelo método. É visível a melhor adequação do perfil modificado relativamente ao perfil final, em qualquer dos casos.

Apesar das diferenças percentuais encontradas, por vezes elevadas, o método permite obter resultados genericamente satisfatórios no que respeita à previsão da erosão acima do NMM. A incorporação das melhorias acima descritas, para o cálculo do volume máximo e para a representação do perfil, poderá ajudar a uma mais correcta aplicação do modelo. Tal permitirá a utilização de um método extremamente simples e que praticamente não requer conhecimentos morfológicos de base, caso se necessite de uma primeira aproximação básica. No entanto, será sempre de considerar que esta metodologia não deve ser empregue para casos e situações específicas, ficando reservada a sua utilização para determinar comportamentos genéricos de sectores costeiros com características semelhantes, requerendo validação para cada deles. Deve-se, ainda, referir que o modelo foi desenvolvido e testado em praias expostas, pelo que a sua utilização em praias de enseada ou encastradas poderá fornecer previsões de menor fiabilidade.

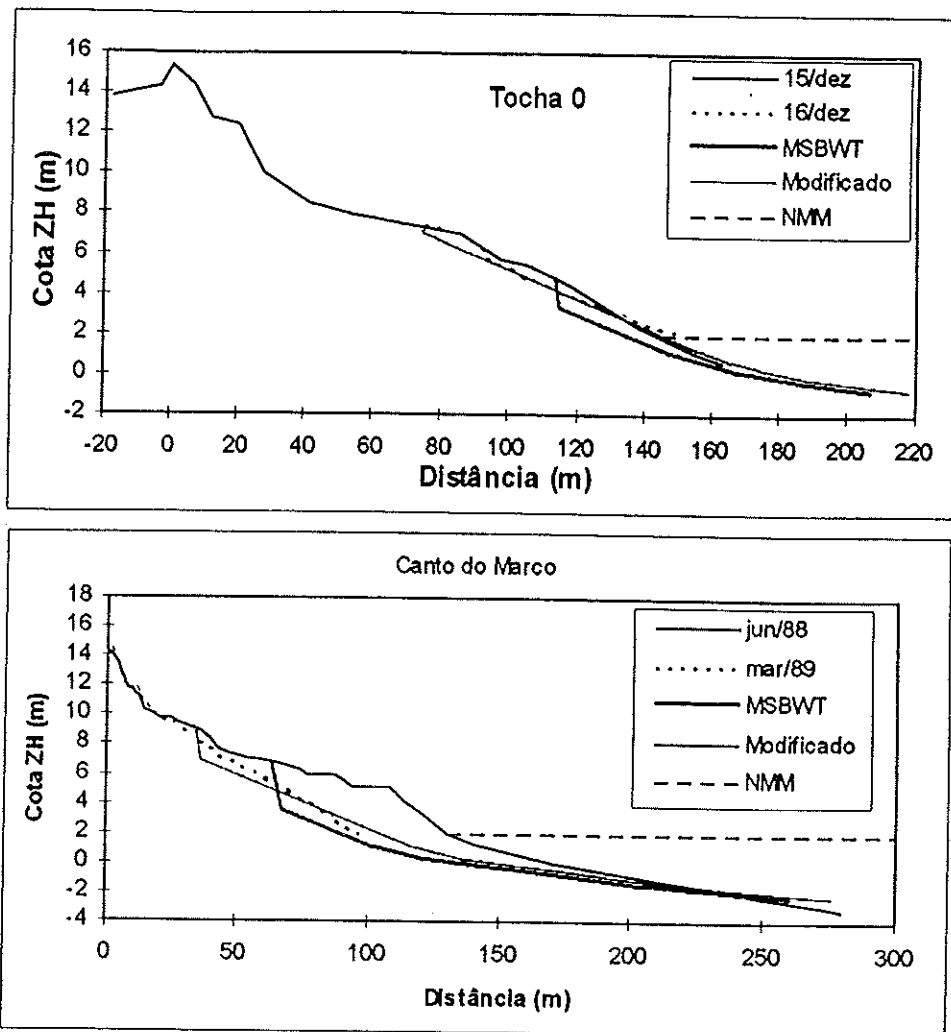


Figura 9.11. Comparação entre previsões de perfis finais obtidos por aplicação do modelo MSBWT original e modificado e comparação com os perfis observados.

### 9.2.3.2. Modelo de convolução

As previsões obtidas com o modelo de convolução mostraram uma elevada adequação relativamente aos valores de campo, obtendo-se desvios entre volumes médios de -21.0% a +23.4% e de volumes perfil a perfil entre os -47.3% e os +58.6%. A média dos desvios médios (em módulo) foi de cerca de 18% e a média dos desvios pontuais foi 22%, indicando que de uma forma geral o método proporcionou aproximações aceitáveis. Efectivamente, essas aproximações não só foram válidas do ponto de vista da previsão da erosão média como, também, no que respeita à erosão praia a praia, indicando que a dependência morfológica estabelecida pelo método é correcta. Apenas algumas excepções contrariaram esta tendência, estando associadas a variações de pequena escala. Assim, o método pode ser aplicado com garantia quer a sectores costeiros, na sua globalidade, quer para cada praia isolada, constituindo este

facto uma melhoria significativa relativamente ao modelo MSBWT. A dificuldade principal (mas também garantia de qualidade) na aplicação deste método consiste na necessidade absoluta de informação morfológica relativa às praias a analisar. Desta forma, é recomendada a utilização deste modelo sempre que houver informação suficiente disponível.

Uma desvantagem do modelo reside no facto de utilizar o declive do perfil inicial como representativo do perfil final. Neste trabalho não se efectuou qualquer tentativa de melhoria desta situação, que poderá ser revista no futuro, por forma a que o perfil final seja mais representativo do perfil inicial. Tal obrigará a uma readaptação das fórmulas de previsão de recuos e de volumes.

### 9.3. APLICAÇÕES DOS MODELOS A CASOS HIPOTÉTICOS

Como referido na introdução deste capítulo, os modelos possuem um número elevado de aplicações de âmbito prático. Neste sub-capítulo pretende-se estimar quais os efeitos de tempestades hipotéticas sobre a costa em estudo, utilizando para tal os modelos testados e validados, conjuntamente com um conhecimento morfológico de base. Este exercício permitirá prever qual o comportamento genérico do sector costeiro e de cada praia, face às tempestades escolhidas, averiguando a sua maior ou menor robustez.

Para estes testes consideraram-se duas tempestades hipotéticas, definidas neste trabalho como *tempestade média* e *tempestade centenária ou secular*, pretendendo representar condições de agitação, duração e sobrelevação associadas a condições médias e a um período de retorno de 100 anos, respectivamente. No primeiro caso, o objectivo é determinar se as praias analisadas possuem as características necessárias à manutenção da duna para uma tempestade de período de retorno baixo e de características intermédias. Na segunda aplicação, pretende-se estimar quais as consequências esperadas para uma tempestade secular, no que respeita à erosão dunar. Dada a melhor representação esquemática do perfil de praia pelo método de convolução e a possibilidade de análise praia a praia, será este o método utilizado de forma preferencial nas previsões, ainda que se apresentem os cálculos e resultados relativos ao modelo MSBWT.

### 9.3.1. Características das praias

Visto não se tratar de uma aplicação ou teste a casos reais, não existindo perfis iniciais definidos, torna-se necessário definir perfis esquemáticos, próximos dos reais, aos quais seja possível aplicar os modelos. Para tal, seleccionaram-se quatro locais, de entre os 10 estudados nesta dissertação. Os pressupostos que estiveram na base da escolha foram:

- utilização de locais robustos (uma praia natural e uma praia associada a obras de engenharia costeira) de acordo com o índice de vulnerabilidade morfológica ( $I_v$ );
- utilização de locais extremamente frágeis (uma praia natural e uma praia associada a obras de engenharia costeira), de acordo com índice  $I_v$ .

Os locais escolhidos foram:

- Praia de Mira Norte (perfil robusto, a montante de um esporão);
- Palheiros da Tocha (perfil natural robusto);
- Vagueira Sul (perfil extremamente frágil, a jusante de um esporão);
- Praia do Areão (perfil natural extremamente frágil).

Considerou-se Praia do Areão como perfil natural porque apesar de se encontrar a jusante de esporões, se localiza a cerca de 5 km da estrutura mais próxima, não estando sob o efeito estritamente directo desta.

Para além destes perfis foi, ainda, escolhido o perfil Vagueira Norte, por ser o único na dependência directa de um enrocamento longilitoral, que constitui o limite interno da praia, separando esta da própria povoação da Vagueira.

Para todos estes locais foram definidos perfis esquemáticos para duas situações: perfil de Verão ou calmaria e perfil médio, tendo-se utilizado os dados recolhidos nas campanhas MOLICEIRO, apresentados no capítulo 7. O perfil de Verão ou calmaria foi determinado de acordo com o envelope superior dos perfis realizados, enquanto que o perfil médio foi obtido pela média dos pontos levantados. Não se considerou aqui um envelope inferior ou um perfil de tempestade ou de Inverno, por ser exactamente esse o objectivo da determinação e porque apenas se desenvolvem após tempestades. Assim, um perfil de tempestade só coincidirá com o perfil inicial caso ocorram duas ou mais tempestades sucessivas, sem recuperação da

praia entre elas. Este tipo de hipótese foi já testada por Ferreira *et al.* (1995) para duas praias da área de estudo (Palheiros da Tocha e Praia do Areão), relativamente a duas tempestades de Setembro e de Outubro de 1987.

Os valores utilizados para os perfis esquemáticos determinados estão expressos na tabela 9.14.

Tabela 9.14. Valores de  $\tan\beta$ , B, W e D utilizados nas aplicações dos modelos a casos hipotéticos.

Locais	$\tan\beta$		B (m)		W (m)		D (m)	
	Verão	Médio	Verão	Médio	Verão	Médio	Verão	Médio
PMN	0.09	0.07	4.8	4.6	99	78	5.7	5.9
PT	0.10	0.07	5.2	5.2	60	47	6.8	6.8
VS	0.10	0.05	4.6	4.7	66	19	2.5	2.3
PA	0.08	0.06	4.7	4.8	35	23	10.5	11.0
VN	0.08	0.07	4.8	4.4	48	39	3.6	4.0

### 9.3.2. Temporal médio

#### 9.3.2.1. Características do temporal

A aplicação dos métodos a um temporal médio para a área em estudo colidiu desde logo com o conceito, inexistente, de temporal médio e, obviamente, com a falta dos seus parâmetros caracterizadores. Assim, procedeu-se à avaliação do que poderá ser considerado um temporal médio, em termos de altura significativa máxima e relativamente à sua duração.

Existem registos sobre tempestades que assolaram a costa oeste portuguesa em vários trabalhos (Pita *et al.*, 1987; Pita e Santos, 1989; Capitão, 1992; Carvalho, 1992; Costa, 1993). Grande parte dos registos existentes, desde o seu início em 1956, encontra-se incompleto ou não possui elevada fiabilidade, pelo menos até ao final dos anos 70, por não corresponderem a registos obtidos com ondógrafos, de forma sistemática. Aliás, a comparação dos dados entre 1956 e 1980 com os dados posteriores a 1980 permite verificar que, mantendo o mesmo patamar acima do qual ocorre um temporal ( $H_{so} > 5$  m), estes terão sido bastante mais frequentes após 1980, mas com altura média mais baixa. Tal relaciona-se com a melhoria dos métodos de registo existentes e, também, com a melhoria da frequência de observações nas últimas duas décadas, fazendo com que a conclusão atrás mencionada não se deva a variações

climáticas mas a melhorias tecnológicas. Desta forma, para o cálculo do temporal médio optou-se por utilizar a listagem de tempestades apresentada em Costa (1993), para a Figueira da Foz, entre 1981 e 1990. Esta autora aponta a existência de cerca de 54 tempestades em 10 invernos, o que dá uma média de 5.4 tempestades/ano. Esta média é notoriamente superior às referidas por Ferreira (1993) e por Andrade *et al.* (1996), próximas das 3 tempestades/ano. Tal deve-se aos últimos autores terem baseado os seus cálculos em registos históricos, que não discriminam todos os eventos com altura significativa ao largo superior a 5 m.

Calculando a média das alturas significativas máximas dos eventos apontados em Costa (1993), obtém-se um valor de  $H_{so} = 6.2$  m, ao qual está associado um período significativo de 14.0 s. A aplicação da formulação de Komar e Gaughan (1972) permite obter uma altura na rebentação, estimada, de 7.6 m. Um temporal com  $H_{so} = 6.2$  m possui um período de retorno inferior a um ano, próximo dos 0.7 anos, de acordo com os dados da tabela 3.4..

A informação relativa à duração destas tempestades é mais imprecisa, visto que o relatório de Costa (1993) apenas apresenta valores de máximos diários. Assim, é apenas possível saber durante quantos dias cada tempestade actuou, mas não exactamente a sua duração precisa em horas, levando a uma estimativa por excesso. A média da duração de actuação obtida foi de 1.5 dias, ou seja, 36 horas. Este valor é inferior ao referido por Andrade *et al.* (1996), onde a duração média das tempestades na costa em estudo será cerca de 4 dias. No entanto, os valores destes autores têm por base registos onde as tempestades de longa duração são predominantes, não se incorporando pequenos episódios com apenas algumas horas de duração, justificando-se assim a diferença verificada.

A determinação dos níveis extremos de actuação para uma tempestade média é ainda mais problemática, visto não existirem estudos conducentes a esses resultados, com base num número alargado de anos. Admitiu-se que esta tempestade poderia actuar em período de maré viva média, cujo valor de maré alta é cerca de 3.4 m, para a zona de Aveiro - Cabo Mondego (Instituto Hidrográfico, 1996). Admitiu-se, ainda, que existiria uma sobreelevação significativa do nível do mar, que possui em Aveiro um valor estimado de 0.31 m, de acordo com Gama *et al.* (1994a). Assim, o nível máximo de actuação da tempestade seria de 3.71 m ZH ou 1.71 m NMM.

### 9.3.2.2. Aplicação do modelo MSBWT

Para a aplicação deste modelo utilizou-se um tempo de subida de 18 h, correspondente a metade do tempo total de duração da tempestade média, admitindo um comportamento simétrico na curva de subida e descida das condições de agitação e sobre-elevação. Desta forma, obteve-se o valor de  $t_r = 64800$  s, para um nível máximo atingido  $S' = 3.71$  m. A aplicação da equação referente à erosão média estimada, acima do NMM, permitiu a previsão de um volume médio de erosão de  $88.4 \text{ m}^3/\text{m}$  para a zona costeira em estudo. Admitindo que o máximo volume de erosão será cerca de 1.3 vezes superior a  $Q_{\text{avg}}$ , então  $Q_{\text{max}} = 115 \text{ m}^3/\text{m}$ , para a tempestade média.

Na figura 9.12. pode ver-se a representação gráfica do modelo relativamente à erosão média prevista, utilizando as alterações de perfil final propostas neste trabalho e um “runup” máximo estimado em 6.4 m ZH.

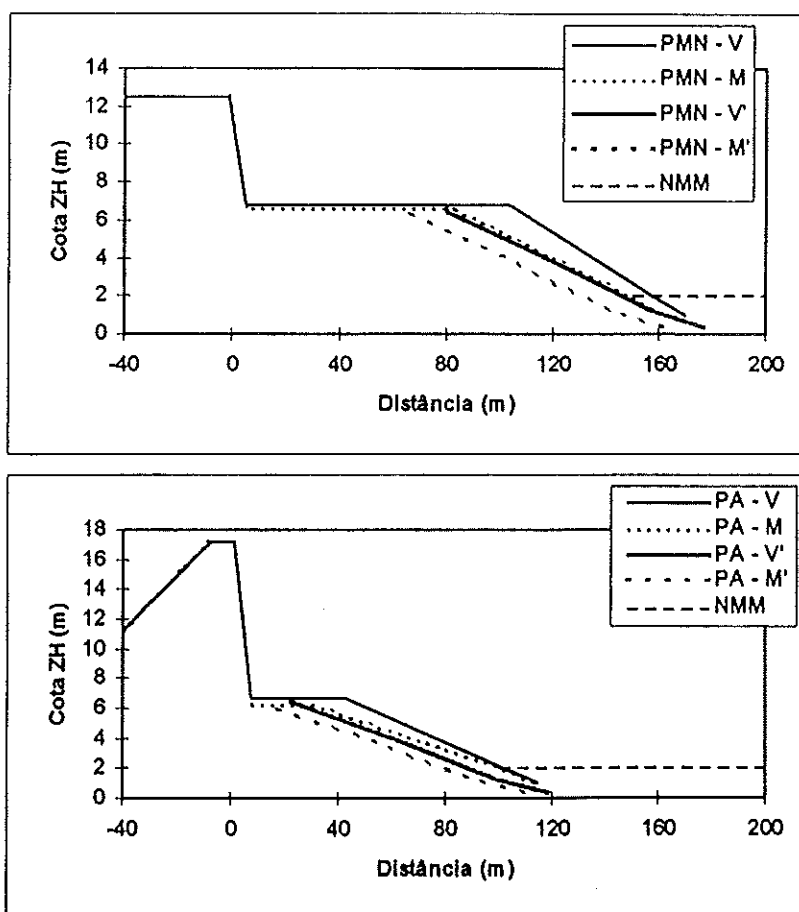


Figura 9.12. Perfis pós-tempestade previstos pelo modelo MSBWT modificado para uma tempestade média hipotética. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação inicial de Verão; M' - Perfil final previsto para situação inicial Média. PMN - Praia de Mira Norte; PA - Praia do Areão.

Comparam-se, nesta figura, os efeitos em duas praias com comportamento distinto: Praia de Mira Norte, com comportamento genérico robusto, e Praia do Areão, com comportamento frágil, para situações de perfil inicial de Verão e Médio. Verifica-se que, em qualquer das situações, a duna não é atingida, ainda que na Praia do Areão a berma seja quase completamente erodida, para um perfil inicial Médio.

### 9.3.2.3. Aplicação do modelo de convolução

Utilizando os parâmetros das praias e da tempestade média, atrás descritos, aplicou-se o modelo de convolução às cinco praias escolhidas, determinando-se os valores de  $R_{\max}$  e  $V_{M\max}$ . De acordo com a aplicação, não se estimaram recuos dunares, pelo que todos os volumes apresentados são respeitantes a variações na berma. Esses valores estão descritos na tabela 9.15., enquanto que os perfis obtidos se encontram representados na figura 9.13.

Tabela 9.15. Valores de  $R_{\max}$  e  $V_{M\max}$  previstos pelo modelo de convolução para uma tempestade média hipotética, em cinco perfis seleccionados.

Perfil	$R_{\max}$ (m)	$V_{M\max}$ (m <sup>3</sup> /m)
PMN - V	21.6	99.7
PMN - M	18.4	85.7
PT - V	22.1	109.6
PT - M	17.3	90.6
VS - V	23.5	102.8
VS - M	13.2	71.2
PA - V	20.1	92.9
PA - M	17.4	77.3
VN - V	19.9	93.8
VN - M	18.9	84.0
Médias	19.2	90.8

A análise da figura permite verificar a inexistência de previsão de erosão dunar, sendo no entanto óbvias as diferenças entre os perfis mais robustos (PMN e PT) relativamente aos mais frágeis (VS e PA). Nestes dois últimos locais, para um perfil inicial médio, o modelo sugere que a berma é quase completamente erodida, estando a duna em vias de ser atingida, tal como já tinha sido evidenciado pelo modelo MSBWT, no caso de Praia do Areão.

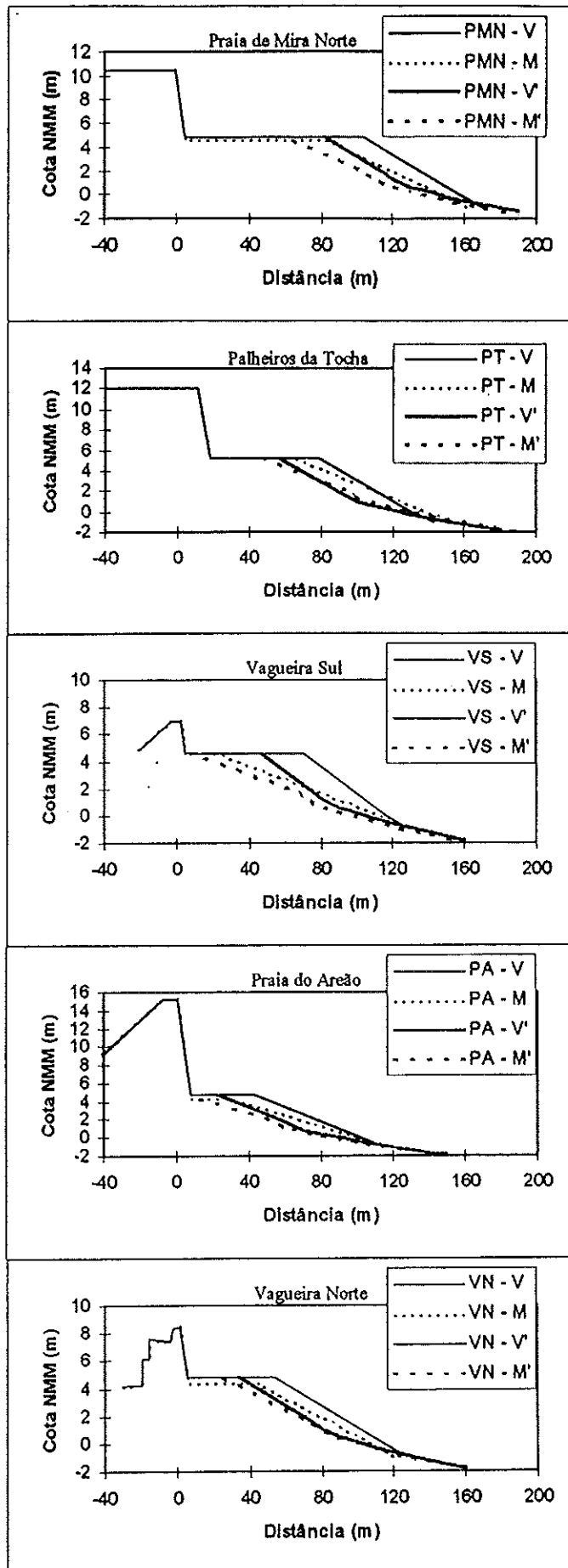


Figura 9.13. Perfis pós-tempestade previstos pelo modelo de convolução para a tempestade média. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação de Verão; M' - Perfil final previsto para situação Média.

#### 9.3.2.4. Comparação entre modelos

Comparando os resultados previstos pelo modelo de convolução com os previstos pelo modelo MSBWT modificado, verifica-se que estes concordam quase completamente nas previsões fornecidas. O volume de erosão médio previsto difere, entre modelos, em apenas  $1.9 \text{ m}^3/\text{m}$ , correspondendo a uma variação relativa de 2.1%. No que respeita ao máximo de erosão a diferença é de  $5.4 \text{ m}^3/\text{m}$ , ou seja, cerca de 5%, entre previsões.

Os perfis obtidos também não diferem de forma considerável, sendo apresentado um exemplo de comparação na figura 9.14., considerando a aplicação dos métodos a uma situação inicial de Verão (V).

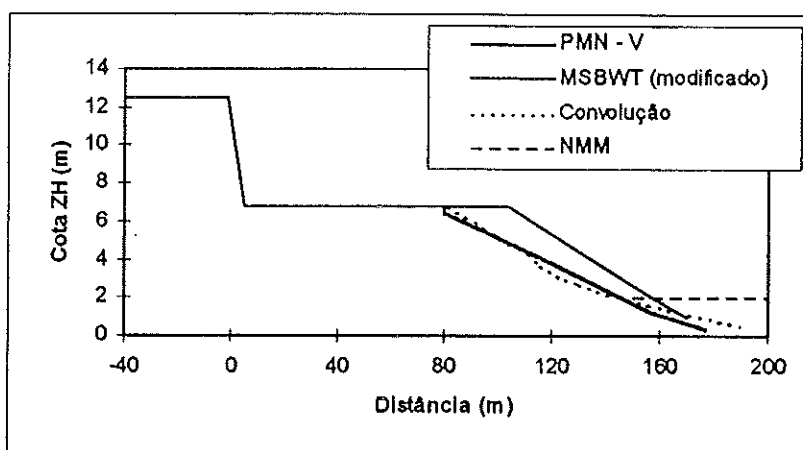


Figura 9.14. - Comparação entre os perfis de erosão previstos pelos dois métodos para uma tempestade média, em Praia de Mira Norte com situação inicial de Verão (V).

Face às previsões obtidas, os métodos parecem apresentar coerência de resultados entre si, o que reforça a possibilidade da sua aplicação.

#### 9.3.2.5. Avaliação de impactes

Nenhum dos métodos previu erosão dunar para a tempestade considerada, nos perfis em que foi aplicado. No entanto, é visível que os perfis mais robustos continuam a possuir bermas bem desenvolvidas após a tempestade, com larguras variáveis entre 35 m e 80 m, enquanto que nos locais mais fragilizados o perfil de erosão quase atinge a duna, partindo-se de um perfil inicial médio. Efectivamente, quer em Vagueira Sul, quer em Praia do Areão, o extremo interno do perfil de erosão fica a cerca de 5 m da

base da duna.

De uma forma geral, os locais analisados evidenciam volumetrias de berma adequadas para responder a tempestades com características intermédias. No entanto, em Vagueira Sul e em Praia do Areão o volume sedimentar existente é bastante reduzido, possibilitando a erosão dunar caso se registe nova situação de elevada energia em seguida, sem que haja recuperação da praia. Tal facto é relativamente comum na costa oeste portuguesa, associado à passagem de sucessivas superfícies frontais.

### 9.3.3. Tempestade centenária ou secular

#### 9.3.3.1. Características da tempestade

A aplicação dos modelos a um temporal com características seculares, isto é, cujo período de retorno seja de 100 anos, afigura-se difícil por não haver registos de agitação tão extensos, na costa oeste portuguesa.

Para a determinação da altura significativa máxima associada a uma tempestade com 100 anos de período de retorno recorreu-se aos trabalhos de Pires e Pessanha (1986a,b) e de Carvalho (1992), tendo-se obtido um valor médio entre previsões de 13.9 m. Mais difícil de determinar é o período associado, tendo-se considerado que seria de esperar que um temporal destas características possuísse um período significativo não inferior a 18 s, próximo do máximo determinado por Capitão (1992) para as tempestades registadas na costa oeste, desde 1956, e semelhante ao valor máximo considerado por Costa (1994), ao longo de quase três anos de registos da bóia-ondógrafo da Figueira da Foz, e por Carvalho e Barceló (1966) em 6 anos de observação.

A utilização dos valores da altura e período de onda referidos permite estimar uma altura de onda na rebentação da ordem dos 16.0 m, recorrendo à formulação de Komar e Gaughan (1972).

Relativamente à duração da tempestade, Andrade *et al.* (1996) referem que o episódio mais longo mencionado nos jornais data de Dezembro de 1914 e possuiu 26 dias de duração. Na comparação entre dados dos jornais com registos efectivos de agitação (após 1956), os autores verificaram a existência de um temporal com 14 dias

de actuação, quer nos registos quer nos jornais, em Janeiro de 1970, e um outro em Fevereiro de 1966, também com 14 dias de duração de acordo com os jornais, mas com apenas 7 dias nos registos de agitação. Esta última tempestade possuiu altura significativa da ordem dos 12 m, ao que corresponde um período de retorno elevado (cerca de 25 anos, de acordo com Pires e Pessanha, 1986a,b).

Para este trabalho optou-se por escolher como tempo de duração mais elevado de uma tempestade os 14 dias obtidos em registo de agitação, e confirmado por Andrade *et al.* (1996), por não se possuir certeza absoluta se os 26 dias relatados em 1914 são correspondentes à mesma tempestade ou à passagem de temporais sucessivos. Desta forma, considera-se que a tempestade centenária poderá atingir as 336 h de duração total, para um tempo de subida de 168 h, equivalente a metade da duração total.

O nível máximo atingido por um temporal deste tipo é igualmente problemático de determinar. Gama *et al.* (1994b) referem que o nível extremo com período de retorno de 100 anos, englobando maré astronómica e sobrelevação meteorológica, deverá ser da ordem dos 4.85 m para Viana do Castelo. Contudo, parece improvável que o temporal centenário ou secular possua, simultaneamente, uma altura com período de retorno de 100 anos e um nível extremo com período de retorno idêntico, visto que estes não estão obrigatoriamente associados. Se, por um lado, será de esperar que este temporal induza uma sobrelevação máxima elevada, já seria pouco provável que ele coincidisse com a maré viva de máxima amplitude secular. No entanto, dado que a duração estimada para a tempestade secular é da ordem das duas semanas, esta terá obrigatoriamente de actuar durante um período de maré viva. Assim, considerou-se que o nível máximo atingido pelo mar corresponderia à soma do nível médio atingido pela maré cheia durante marés vivas (3.4 m ZH) com a sobrelevação máxima observada em Aveiro nos registos estudados (cerca de 0.8 m), obtendo-se um valor final de 4.2 m ZH, ou de 2.2 m NMM.

#### 9.3.3.2. Aplicação do modelo MSBWT

Utilizando um tempo de subida de 168 h (604800 s) e um nível extremo  $S' = 4.2$  m, este modelo prevê um volume de erosão médio de  $644 \text{ m}^3/\text{m}$ . Admitindo que o volume de erosão máximo é cerca de 1.3 vezes superior, este atingirá os  $837 \text{ m}^3/\text{m}$ .

Na figura 9.15. pode observar-se um exemplo de representação gráfica dos perfis finais esperados, para a Praia de Mira Norte (robusta) em situação de Verão. Regista-se a previsão de erosão dunar elevada. Nas praias menos robustas, o volume de erosão previsto corresponde a uma ablação total do cordão dunar, implicando a inundação da zona situada para o interior relativamente à duna. O máximo nível de "runup" estimado e utilizado na representação gráfica foi de 9.4 m ZH.

Deve-se frisar que, pelo facto do perfil de erosão utilizado possuir um pendor único e não apresentar uma concavidade, como seria esperado, o recuo horizontal previsto é forçosamente superior, pelo que a erosão dunar deveria ser ligeiramente inferior.

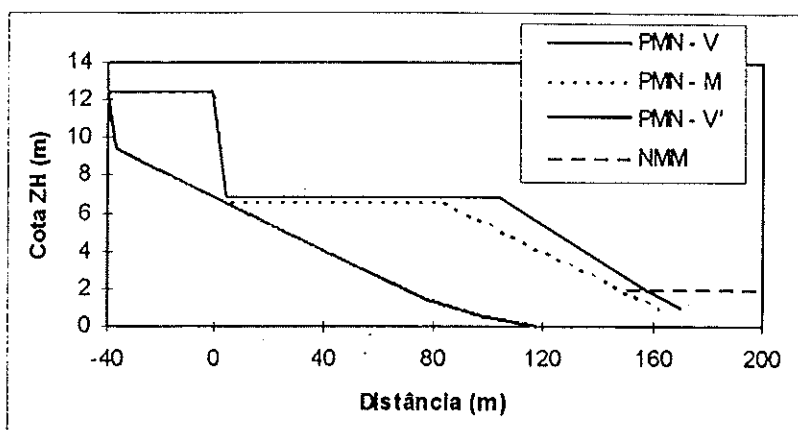


Figura 9.15. Perfil pós-tempestade previsto pelo modelo MSBWT modificado para a tempestade secular hipotética. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação inicial de Verão.

### 9.3.3.3. Aplicação do modelo de convolução

Utilizou-se o modelo de convolução nas 5 praias anteriormente seleccionadas e para as duas situações iniciais possíveis (perfil de Verão - V e perfil médio - M), determinando-se os valores de  $R_{max}$  e de  $V_{Mmax}$  esperados em cada local. Os resultados obtidos estão expressos na tabela 9.16. Apenas em um dos casos testados não se registou recuo dunar (PMN - V'), sendo os valores de  $R_{max}$  e de  $V_{Mmax}$  relativos ao recuo e volume erodido da berma. Em todos os restantes casos se previu uma erosão total da berma, pelo que os valores de  $R$  apresentados são apenas respeitantes à evolução dunar prevista ( $R_{OD}$ ) e os valores de  $V_{Mmax}$  dizem respeito ao somatório dos volumes de erosão estimados para a berma e para a duna.

Tabela 9.16. Valores de  $R_{max}$  e  $V_{Mmax}$  previstos pelo modelo de convolução para uma tempestade secular hipotética, em cinco locais seleccionados.

Perfil	$R_{max}$ (m)	$V_{Mmax}$ (m <sup>3</sup> /m)
PMN - V	84.3 <sup>a</sup>	393.7 <sup>b</sup>
PMN - M	4.9	407.4
PT - V	22.4	567.2
PT - M	25.6	548.1
VS - V	22.8	452.2
VS - M	45.0	415.3
PA - V	34.1	676.0
PA - M	37.1	663.2
VN - V	31.8	490.1
VN - M	36.8	477.7
Médias	26.1 <sup>c</sup>	509.1

<sup>a</sup> Recuo da berma; <sup>b</sup> Volume erodido da berma; <sup>c</sup> Em PMN-V considerou-se  $R_{max} = 0$ , por não haver recuo da duna.

Os perfis relativos a estas previsões estão representados na figura 9.16., sendo visível erosão dunar em quase todos, excepto para PMN - V'. Dada a elevada volumetria da berma e a acentuada robustez do cordão dunar em PMN e em PT, a previsão não contempla para estas praias a possibilidade de destruição total do cordão dunar. Desta forma, não se prevê, igualmente, que as casas situadas em Palheiros da Tocha e em Praia de Mira possam ser atingidas, ainda que no segundo caso pudessem ocorrer danificações em locais onde o cordão dunar foi destruído (ex.: junto à marginal). Pelo contrário, os cordões dunares de Vagueira Sul e de Praia do Areão seriam completamente destruídos, existindo possibilidade franca de galgamento total e de inundaçãõ da parte interior ao cordão dunar.

Relativamente ao local Vagueira Norte, seria de esperar o colapso do enrocamento, com inundaçãõ da estrada da marginal, admitindo-se inclusive a possibilidade de danificações importantes nos prédios e em casas localizadas junto à referida estrada.

Refere-se, ainda, que o máximo nível de "runup" previsto para este temporal hipotético (9.4 m ZH ou 7.4 m NMM) seria por si só suficiente para galgar o cordão dunar em Vagueira Sul e ficaria relativamente próximo do topo do enrocamento em Vagueira Norte, que em 1995 (após algumas obras de reconstrução e reforço) era de 9.9 m ZH.

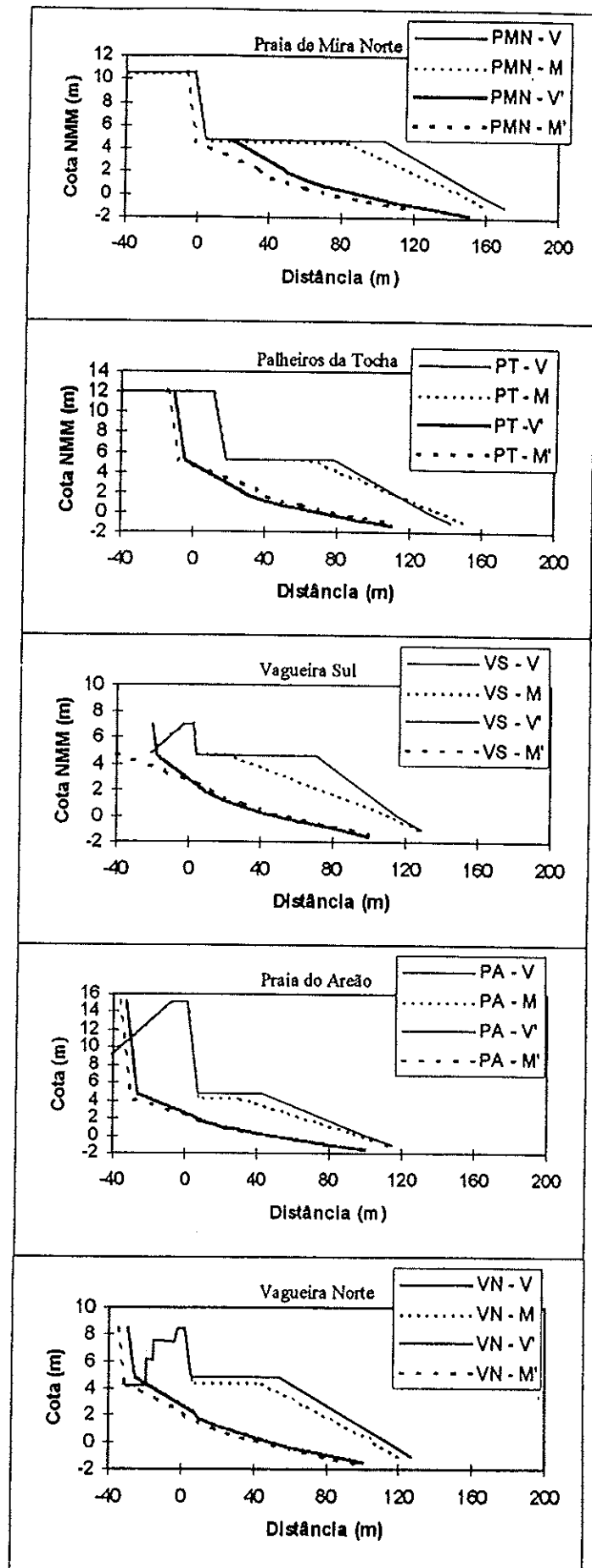


Figura 9.16. Perfis pós-tempestade previstos pelo modelo de convolução para a tempestade secular. V - Perfil inicial de Verão; M - Perfil inicial Médio; V' - Perfil final previsto para situação de Verão; M' - Perfil final previsto para situação Média.

#### 9.3.3.4. Comparação entre modelos

Os resultados obtidos pelos modelos MSBWT (modificado) e de convolução foram qualitativamente próximos, ainda que quantitativamente tenham existido algumas diferenças de previsão. Assim, o volume médio previsto pelo método MSBWT é superior em cerca de 21% ao estimado pelo modelo de convolução. A diferença entre volumes máximos foi de 19%, também com o modelo MSBWT a prever valores superiores. Desta forma, com excepção de dois casos, os perfis obtidos pela aplicação do modelo MSBWT prevêem maior erosão dunar do que os determinados pela utilização do modelo de convolução, registando sempre níveis de erosão dunar acentuados. O facto do modelo de convolução ser aplicável praia a praia, permitindo integrar directamente as características morfológicas próprias de cada local, permitiu discriminar quais as praias onde essa erosão seria dominante, verificando-se uma capacidade de resposta mais positiva por parte das praias consideradas robustas (PMN e PA).

O modelo de convolução permite, ainda, a obtenção de um perfil de erosão possivelmente mais próximo do real, neste caso, pois apesar de utilizar o declive inicial da face da praia, possibilita uma representação aproximadamente côncava da praia até ao nível extremo atingido, contrariamente à representação do modelo MSBWT, que utiliza um pendor único.

#### 9.3.3.5. Avaliação de impactes

Alguma da avaliação de impactes associados à actuação de uma tempestade centenária foi já efectuada na análise das previsões de cada modelo, para as praias utilizadas nessas aplicações. Cabe aqui avaliar o comportamento esperado da globalidade da área de estudo.

De acordo com os métodos utilizados, para que não ocorra erosão do cordão dunar na área de estudo, por uma tempestade centenária, a alta e a média praia deverão possuir, em média, um volume conjunto de pelo menos 500 m<sup>3</sup>/m de areia disponível, acima do NMM, podendo mesmo ser necessário um volume extremo de 800 m<sup>3</sup>/m. Dos 39 perfis efectuados entre Setembro de 1992 e Junho de 1993, apenas em 4 deles

se registaram volumes superiores a  $500 \text{ m}^3/\text{m}$ , sendo o volume máximo de  $560 \text{ m}^3/\text{m}$ , em Praia de Mira Norte, enquanto que o volume médio de todos os levantamentos foi de  $350 \text{ m}^3/\text{m}$ . Desta forma, conclui-se que face a uma tempestade desta magnitude não será de esperar que existam muitos locais com robustez suficiente para evitar a erosão dunar e que, em alguns deles, esta poderá ser completa, levando à ablação total do referido cordão. Dos 10 locais analisados neste estudo, aqueles que poderão estar mais sujeitos a que tal aconteça deverão ser Praia de Mira Sul, Praia do Areão, Vagueira Sul e Vagueira Norte, todos com volumes médios inferiores a  $300 \text{ m}^3/\text{m}$ , para o conjunto alta + média praia. Os menos afectados deverão ser Palheiros da Tocha, Praia de Mira Norte e Vagueira Entre Esporões, com volumes médios superiores a  $400 \text{ m}^3/\text{m}$ .

O galgamento e destruição completa do cordão dunar frontal terá como consequência a inundação das áreas interiores adjacentes. Em locais como Vagueira ou Praia do Areão, onde essas zonas interiores possuem cotas bastante baixas, será de esperar que essa inundação assuma proporções mais elevadas. Por outro lado, as edificações ou a ocupação de solo que aí ocorram poderão ser seriamente afectadas.

As simulações efectuadas utilizaram como condições iniciais perfis de Verão ou perfis médios, pelo que caso se verificasse a existência de um temporal secular após a actuação prévia de uma tempestade menor, as consequências que daí adviriam poderiam ser ainda mais graves do que as obtidas com estas condições iniciais.

Refira-se, ainda, que as praias utilizadas como sendo teoricamente mais frágeis e que se comportam como tal nas previsões efectuadas, coincidem com locais que possuem valores de índice de vulnerabilidade morfológica ( $I_v$ ) elevado, pelo que este índice de macroescala poderá também ser um bom indicador para determinar locais onde os efeitos de tempestades se deverão fazer sentir com maior importância.

#### 9.4. SÍNTESE

Após análise dos modelos existentes na literatura, procedeu-se ao estabelecimento de pressupostos que levaram à escolha de dois modelos simples, para o cálculo do volume de erosão e do tipo de perfil decorrente da actuação de tempestades. Os modelos escolhidos, com possibilidade de adequação à área em estudo, foram o Modelo MSBWT (*Multiple Shore-Breaking Wave Transformation*

*Model*) e o Modelo de Convolução.

O modelo MSBWT possui características muito simples de aplicação, tendo uma base completamente empírica e dependendo, sobretudo, do nível atingido pelo mar (maré astronómica + sobreelevação). O modelo possui, ainda, forte influência da duração da tempestade, demonstrando uma capacidade de inclusão do factor tempo. Não engloba características morfológicas no cálculo de volumes, pelo que não permite uma aplicação praia a praia. Possibilita, no entanto, uma primeira aproximação simples e a obtenção de um valor de previsão de volume de erosão para uma área genérica.

O modelo de convolução possui, igualmente, forte dependência do nível de sobreelevação e do tempo de resposta de cada praia relativamente à tempestade em causa, integrando a duração de cada evento e o tempo de resposta de cada praia. O uso conjunto de parâmetros morfológicos e hidrodinâmicos e de uma dependência temporal, permite a utilização do modelo praia a praia. Possui, no entanto, uma relativamente reduzida sensibilidade a variações na altura da onda, utilizando valores constantes de agitação para a totalidade do temporal.

A aplicação de modelos deste tipo foi validada tendo por base dois eventos concretos, ocorridos em Fevereiro de 1989 e em Dezembro de 1992, para os quais existiam dados de morfologia, maregráficos e de agitação. O temporal de Fevereiro de 1989 corresponde a uma situação com período de retorno de cerca de 3 anos, enquanto que o de Dezembro de 1992 corresponde a um período de retorno de quase 1 ano, tendo por base a altura da onda ao largo.

Da análise comparada dos resultados da aplicação dos modelos verifica-se que, apesar das grandes diferenças de conceito e de aplicação entre eles, os resultados médios obtidos se afastam entre si cerca de 15%, com variações máximas de 30%. Tal permite afirmar que, de uma forma genérica e para previsões médias, os valores são comparáveis, não apresentando diferenças muito acentuadas.

O modelo MSBWT registou, contudo, variações mais elevadas quando se comparam os resultados de campo com as previsões médias obtidas (entre -5.6% e +52.7%). Estas variações podem considerar-se aceitáveis dado que o objectivo do modelo é prever um valor global para um sector costeiro, não contabilizando variações praia a praia. O mesmo já não se poderá referir da previsão máxima do método, que indica volumes de erosão superiores em 78% a 143% aos valores registados. Tendo por base a comparação entre volumes máximos e médios de erosão para a área de

estudo estabeleceu-se que, para uma correcta aplicação da formulação, se deveria utilizar a relação  $Q_{\text{max}}/Q_{\text{cavg}} = 1.3$  e não 2.2 como proposto no modelo MSBWT. Esta diferença deverá resultar, sobretudo, do modelo ter sido desenvolvido com base num importante conjunto de dados associados à acção de furacões, que induzem picos de erosão muito elevados e localizados. A previsão do perfil de praia pós-tempestade mostrou-se, igualmente, desajustada à área em questão, tendo sido revista e adequada à morfologia da zona em estudo.

A aplicação do modelo de convolução produziu resultados francamente positivos, com uma diferença média entre previsões e dados de campo de apenas 18%, estando as variações máximas observadas enquadradas entre -47.3% e +58.6%. As previsões foram igualmente muito satisfatórias na aplicação praia a praia, demonstrando que as dependências morfológica e temporal do método são correctas. O principal desajuste registado reside no facto do modelo utilizar o declive do perfil inicial como representativo do perfil final. A introdução de alterações para melhoria desta situação teria obrigado à reformulação das equações utilizadas e propostas pelos autores do modelo, pelo que não foram efectuadas, facto que poderá ocorrer no futuro.

Tendo como base de comparação a análise de deVriend (1991), que refere erros de 100% como sendo aceitáveis para este tipo de modelos, verifica-se que, de uma forma geral, as previsões obtidas apresentaram diferenças bem menores, possibilitando a validação e aplicação dos modelos testados à área em questão. Assim, após definir os parâmetros de "Tempestade Média" (período de retorno de 0.7 anos) e de "Tempestade Centenária ou Secular" (período de retorno de 100 anos), aplicaram-se os dois modelos a cinco das praias analisadas neste trabalho (Vagueira Norte, Vagueira Sul, Praia do Areão, Praia de Mira Norte e Praia da Tocha).

Para a tempestade média hipotética não foi prevista erosão dunar por qualquer dos métodos, em qualquer perfil, utilizando como perfis iniciais o perfil médio e o perfil de Verão. No entanto, os dois locais menos robustos (Vagueira Sul e Praia do Areão) passariam a possuir bermas muito reduzidas, facilitando a actuação de um qualquer evento extremo seguinte, caso não ocorresse rápida recuperação da praia. Importa referir que a existência de vários eventos erosivos sucessivos é relativamente frequente na costa oeste portuguesa, associados à passagem sequencial de superfícies frontais.

Relativamente ao temporal centenário hipotético, concluiu-se que seria necessário um volume conjunto de areia na média e alta praia (acima do nível médio do mar) da ordem dos 500 m<sup>3</sup>/m a 800 m<sup>3</sup>/m para que não ocorresse erosão dunar acentuada, de acordo com as previsões dos modelos. Tal volume não é frequente nas praias da área em estudo, apenas ocorrendo pontualmente, em situações de Verão. Assim, uma tempestade de tal magnitude levará à ablação de uma parte considerável do cordão dunar frontal e, até, ao seu total desaparecimento, nos locais mais frágeis ou onde esse cordão possui menor largura. Neste caso, verificar-se-iam galgamentos e inundações de áreas adjacentes. Dos locais analisados nesta dissertação, os mais afectados seriam Praia de Mira Sul, Praia do Areão, Vagueira Sul e Vagueira Norte, pelo seu menor volume global. Todos eles, com excepção de Vagueira Norte, coincidem com locais que têm vindo a sofrer recuo acentuado da linha de costa, pelo que, com o tempo, o cordão dunar possuirá cada vez menor largura e volume, fazendo com que a sua ablação total vá sendo mais facilitada.

O tipo de previsões aqui efectuado poderá ser adequado, no futuro, às situações que se entender serem representativas do sector costeiro analisado e do regime de agitação em vigor, permitindo definir zonas de máxima actuação de temporais, linhas limite de ocupação (mesmo que sazonal) e volumes necessários à realimentação de praias por forma a que estas não entrem em ruptura ou que não exista erosão e recuo do cordão dunar.

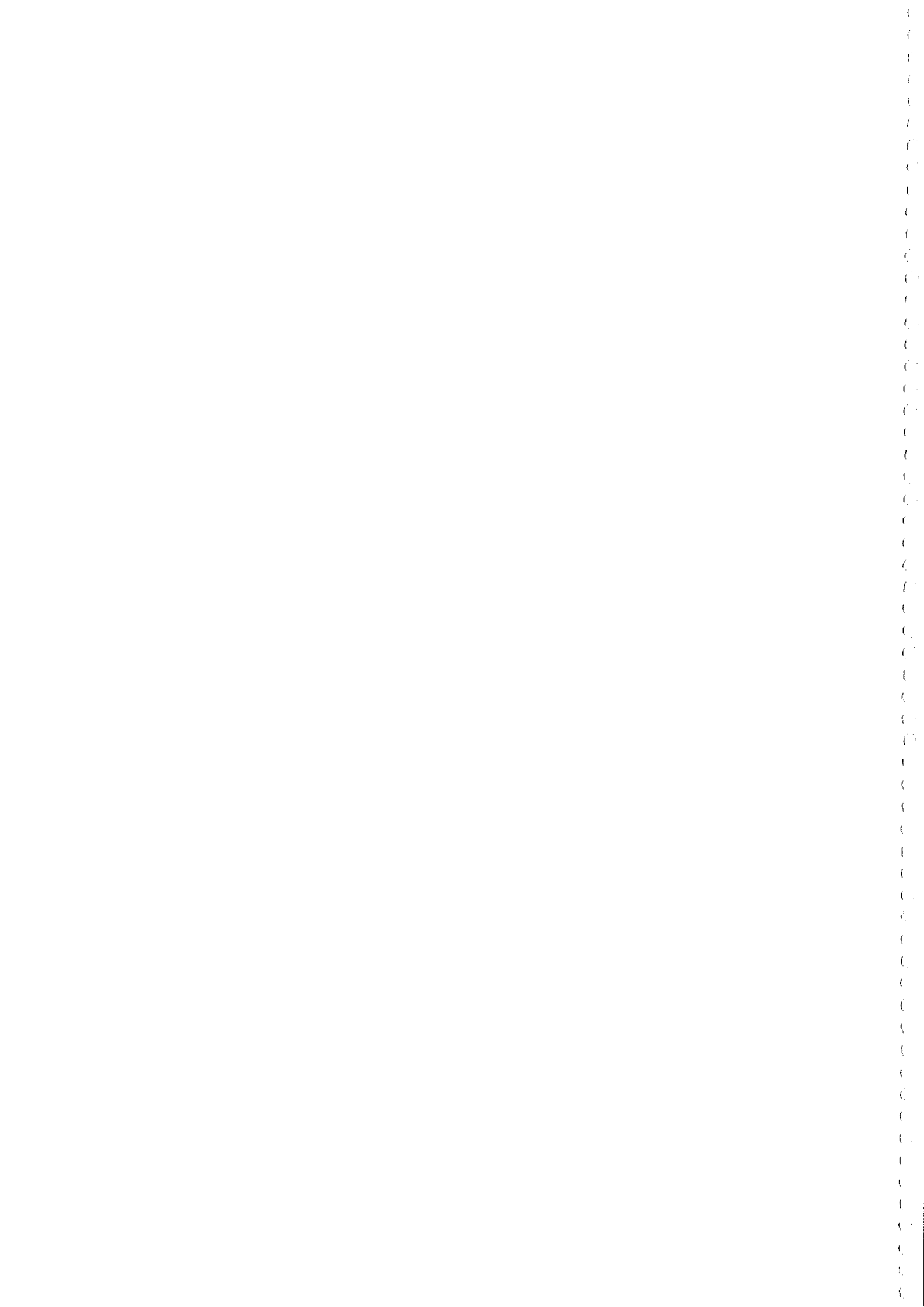
Para que estes modelos demonstrem ser uma ferramenta de gestão útil e adequada, será fundamental a sua avaliação e aplicação continuada a casos específicos e, eventualmente, a introdução de melhorias nas suas formulações, minimizando falhas ou lacunas já mencionadas.

*Como temos o condão de estragar tudo,  
empobrecemos as populações da beira-mar, para  
enriquecer meia dúzia de felizes. Cultivar o  
mar é uma coisa - é ofício de pescadores;  
explorar o mar é outra - é ofício de industriais.*

*Raul Brandão (Os Pescadores)*

## **PARTE IV**

### **Súmula**



## 10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo final efectua-se uma análise do trabalho desenvolvido, evidenciando as principais concretizações desta dissertação, bem como as lacunas existentes. Procede-se, assim, à execução de um balanço final que permite apontar linhas futuras de trabalho ou de desenvolvimento de estudos já iniciados.

As conclusões e recomendações decorrentes deste estudo foram expressas nas sínteses efectuadas no final de cada capítulo de análise, pelo que serão agora referidas de forma sumária (tentando minorar a repetitividade, sempre presente neste tipo de dissertações).

### 10.1. ANÁLISE ESTRUTURAL

A dissertação apresentada possui uma estrutura modular, regida pelos objectivos propostos inicialmente e tendo como base a observação do litoral a partir do mar e dos seus agentes modeladores. Assim, analisou-se inicialmente a transformação da onda e da energia associada, ao longo das zona de pré-praia e praia, incluindo a rebentação e o espraio. Posteriormente, caracterizaram-se as consequências morfológicas e morfodinâmicas, a escalas temporais distintas, determinando comportamentos genéricos e específicos das praias da área em estudo. Estes estudos foram pontualmente complementados com resultados obtidos na costa algarvia, aumentando a quantidade e qualidade da base de dados utilizada e abrangendo uma maior diversidade de situações analisadas. Por fim, aplicaram-se modelos de previsão da resposta das praias a eventos extremos. Pretendeu-se, ainda, para além do carácter académico e científico inerente a uma dissertação deste teor, não esquecer a parte aplicada do trabalho, ressaltando algumas das possibilidades de utilização prática das conclusões obtidas.

De forma geral, a disposição em estrutura modular permitiu uma fácil adequação aos objectivos iniciais e uma relativa independência entre capítulos, mas também uma análise sequencial lógica, com integração nos capítulos finais de algumas das conclusões obtidas nos módulos iniciais.

## 10.2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E LACUNAS

### 10.2.1. Transformação da altura das ondas

#### *Principais resultados obtidos:*

- A atenuação média da agitação observada na campanha Tocha 92 foi de 60% entre a primeira e a segunda linha de rebentação e de 82% desde a rebentação inicial até à rebentação final;
- Verificou-se que as barras submersas possuem papel fundamental no amortecimento da altura da onda incidente, com conseqüente minimização dos efeitos sobre a face da praia;
- Adequaram-se formulações empíricas para determinação de taxas de reformação de altura da onda ( $H_r/H_b$ ) em função da altura da onda incidente e da profundidade na coluna de água;
- Observou-se que a altura da onda reformada se situa entre 25% e 50% do valor médio da profundidade a que se encontra a crista da barra submersa responsável pela rebentação da onda incidente.

#### *Principais lacunas registadas:*

- A inexistência de dados de campo referentes à profundidade da coluna de água na rebentação e sobre a crista das barras submersas não permitiu obter ajustes mais adequados nos coeficientes empíricos empregues, em função da variabilidade na profundidade. Este, deverá constituir o principal factor responsável pela dispersão de dados, conjuntamente com a agitação incidente;
- Apesar das condições de agitação terem sido muito variadas, atingindo-se inclusive situações de muito elevada energia, o recurso a resultados de apenas uma campanha, com observações concentradas num período de três semanas, impõe limitações às conclusões apresentadas;

## 10.2.2. Dissipação de energia das ondas

### *Principais resultados obtidos:*

- Observou-se uma dissipação média de energia, entre a primeira e a terceira linha de rebentação, em Tocha 92, de cerca de 95%, aumentando o valor para mais de 99% caso se considerem apenas os conjuntos de ondas com rebentação inicial significativa. Estes valores vêm reforçar o papel fundamental que as barras submersas têm na restrição da energia das ondas que atingem a face da praia, por indução de rebentação;
- Introduziu-se o conceito de escala de agitação, tendo este factor sido comparado com a taxa adimensional de energia relativa dissipada, através do estabelecimento de uma formulação empírica que relaciona a energia dissipada da primeira para a última rebentação com a altura da onda inicial. Considerou-se que o coeficiente empírico determinado deverá ser condicionado pela morfologia das barras submersas, diminuindo para barras com maior volumetria (maior atenuação) e aumentando para barras menores (menor atenuação);
- Verificou-se o efeito da sobrelevação do nível do mar na diminuição da energia da onda dissipada, através do aumento de profundidade da coluna de água, tendo-se obtido uma forma de cálculo da energia não atenuada quando ocorre sobrelevação;
- Os resultados obtidos poderão ser utilizados no controlo dimensional de barras submersas, determinando áreas de menor dissipação ou de degradação das estruturas submersas e indicando locais onde a intervenção poderá ser necessária.

### *Principais lacunas registadas:*

- O coeficiente empírico determinado, que relaciona a taxa adimensional de energia relativa dissipada com o parâmetro de escala de agitação deverá ser dependente das condições morfológicas das barras. A inexistência de

medições directas da morfologia das barras impossibilitou a determinação da evolução desse coeficiente forma concreta, pelo que esta deverá ser avaliada e verificada com dados complementares, a obter em campanhas definidas para esse fim;

- Tal como já foi referido, o recurso a dados de uma única campanha é limitativo das conclusões apresentadas, apesar do conjunto de dados possuir uma elevada diversidade.

### 10.2.3. Níveis de "runup"

#### *Principais resultados obtidos:*

- A comparação dos dados obtidos nas campanhas Tocha 92 e Areão 95 evidenciou a truncatura superior do espectro de distribuição do "runup" em Tocha 92, provavelmente associado ao efeito atenuador da rebentação sobre barras submersas;
- Observou-se uma correlação entre níveis de "runup" e a agitação ao largo, mas não com a agitação na face da praia, indicando que as oscilações de longo-período poderão influenciar de forma decisiva os níveis atingidos, propagando uma "memória" da agitação incidente, após rebentação e reformação;
- A adaptação de uma formulação semelhante à de Hunt, com coeficiente empírico adequado às condições observadas, permitiu a previsão de níveis máximos de "runup" para a área de estudo, em função da altura da onda incidente. Com este tipo de previsão é possível obter um melhor dimensionamento das reconstruções dunares, por forma a evitar a ocorrência de galgamentos. Para condições de agitação com um período de retorno de 100 anos, previu-se que o nível máximo de "runup" atingiria cerca de 10 m ZH, o que levaria ao galgamento de grande parte do cordão dunar actual, bem como à danificação de várias estruturas implantadas na área em causa.

*Principais lacunas registadas:*

- Apesar de ter sido observada no campo a influência das interações onda-onda e de oscilações de longo período nos níveis de "runup", esta dependência não foi medida, impossibilitando a sua inclusão em formas de previsão. Futuros métodos de previsão, mais adequados, deverão incorporar o efeito das oscilações de baixa frequência no "setup" e no espraio;
- A influência directa da rebentação sobre barras submersas nos níveis de "runup" parece resultar na diminuição dos valores máximos atingidos. Contudo, o reduzido número de dados obtidos em condições de alta energia não permitiu quantificar a relação entre as variáveis.

10.2.4. Morfodinâmica de macroescala

*Principais resultados obtidos:*

- A aplicação dos parâmetros morfodinâmicos às praia da área de estudo, quando subdivididas em três zonas: face da barra externa, face da barra interna e face da praia, permitiu obter comportamentos parcelares e não apenas genéricos, possibilitando uma melhor interpretação do comportamento dinâmico da praia;
- Para as condições de agitação testadas, o comportamento da face da barra externa foi genericamente dissipativo, possuindo rebentação progressiva, enquanto que a face da praia possuiu ambiente morfodinâmico intermédio a reflectivo, com domínio da rebentação do tipo mergulhante. A transição entre estes locais é efectuada pela barra interna, com comportamento dissipativo a intermédio e rebentação genericamente progressiva, tendendo para mergulhante com a diminuição da altura da onda. Na ausência da barra interna é a própria face da praia que constitui ambiente de transição;
- A análise volumétrica permitiu constatar a elevada diferença existente entre locais próximos, na área de estudo, estando as praias com menor volume sedimentar localizadas geralmente a sul de esporões e denotando recuo;

- A análise comparada das variações volumétricas entre praias evidenciou a existência de um grupo de locais com comportamento mais próximo entre si, constituído por praias não afectadas directamente por estruturas costeiras e por praias situadas a norte de esporões. A detecção, no futuro, de uma variação sistemática de comportamento num dos locais deste grupo, poderá indicar alterações associadas a lacunas sedimentares, influência de estruturas de engenharia costeira, etc.;
- O conceito de índice de vulnerabilidade morfológica foi introduzido, relacionando a variabilidade morfológica anual de uma praia com o seu comportamento a médio-prazo. Determinaram-se limites de fragilidade e robustez de praias, com base em dados de campo, concluindo-se que valores de  $I_v < 0.35$  indicam praias robustas, valores de  $I_v$  entre 0.35 e 0.9 caracterizam praias frágeis e valores de  $I_v > 0.9$  correspondem a praias extremamente frágeis;
- A validação do índice de vulnerabilidade morfológico demonstrou que as praias com valores de  $I_v$  elevados coincidiram com aquelas em que ocorreu recuo dunar efectivo, na área em estudo;
- Com base no  $I_v$ , desenvolveu-se um índice associado, o índice do momento ( $I_M$ ), que permite a aplicação do índice de vulnerabilidade morfológica a uma condição particular da praia, em determinado momento. Este índice possibilita determinar se o sistema entrou em fragilização e se, como tal, necessita de intervenção;
- Os índices de vulnerabilidade apresentados constituem uma ferramenta de apoio à gestão costeira com elevado potencial de aplicação. Exigem, no entanto levantamentos continuados, nomeadamente após eventos erosivos;
- O estudo da máxima variação vertical entre perfis permitiu registar valores muito diferentes de local para local, dificultando a sua previsão através da aplicação das formulações existentes. A integração do índice de vulnerabilidade morfológica na equação de previsão permitiu definir a variabilidade vertical em função da agitação incidente e das condições morfológicas, fornecendo estimativas praia a praia;
- Os critérios de Larson e Kraus e de Sunamura e Takeda possibilitaram a

obtenção das previsões de transição entre perfil de barra e perfil de berma, mais adequadas aos dados em questão. Este tipo de formulações constitui uma abordagem semi-quantitativa ao estudo da variação de comportamento da praia associada à alteração das condições de agitação, estimando para que limites se transita de um tipo de perfil para outro.

*Principais lacunas registadas:*

- A determinação mais rigorosa dos limites propostos para o índice de vulnerabilidade morfológica necessitará, no futuro, da inclusão de um maior número de dados, com séries de perfis mais vastas e, se possível, em locais onde seja possível evidenciar diferentes valores de  $I_v$  ao longo do período de monitorização;
- Os índices de vulnerabilidade morfológica foram apenas testados para praias arenosas expostas, pelo que não se deverão utilizar, sem análise prévia, em praias com condições morfodinâmicas (ex.: praias encastradas ou praias ultradissipativas) ou sedimentológicas (ex.: praias cascalhentas) muito distintas;
- O conjunto de dados utilizado para a aferição da transição de tipo de perfil (barra/berma) foi relativamente reduzido, sendo necessário um maior número de dados para uma mais correcta determinação dos limites de transição;
- As formulações utilizadas para a determinação da transição barra/berma deverão ser testadas no futuro, se possível englobando parâmetros morfológicos que, neste momento, com raras excepções, não são considerados.

#### 10.2.5. Morfodinâmica de mesoescala (variações diárias)

*Principais resultados obtidos:*

- A comparação entre perfis contíguos evidencia uma elevada variabilidade

volumétrica lateral entre perfis, associada à existência e migração de forma rítmicas, que por vezes se sobrepõe às variações transversais detectadas à mesoescala;

- A variação volumétrica diária não permitiu obter resultados concordantes entre a transição erosão/acreção e a transição barra/berma, concluindo-se que as variações volumétricas diárias não são, por si só, suficientes para explicar as tendências de comportamento à mesoescala, contrariamente ao que foi observado em macroescala;
- A transição entre perfis de barra e de berma prevista por formulações concorda com o observado, quando comparada com o comportamento morfológico no campo mas não com a variação volumétrica diária;
- O teste dos vários índices existentes para a determinação da transição barra/berma indicou que os índices de Dean ( $K$ ) e de Larson e Kraus ( $c$ ) são os mais adequados à área de estudo, sendo propostos os seguintes limites:  $c < 1.75$  ou  $K < 5.6$ , perfil de berma;  $1.75 < c < 1.9$  ou  $5.6 < K < 6.1$ , transição ou estabilidade;  $c > 1.9$  ou  $K > 6.1$ , perfil de barra;
- O somatório directo do nível de "runup" previsto e do nível máximo de maré permitiu uma aproximação razoável na determinação da elevação da berma, quando esta se encontra em fase de construção. Este tipo de previsão pode ser útil no dimensionamento de bermas para realimentação artificial, permitindo o cálculo das alturas máximas de bermas adequadas ao hidrodinamismo e morfologia vigentes na área a intervir;
- A aplicação de formulações para previsão do pendor da face da praia recorreu aos valores de alturas de onda ao largo em detrimento das alturas na rebentação sobre a face da praia, por possibilitarem melhor ajuste. Contudo, a dispersão de valores obtida foi muito elevada, não permitindo a previsão rigorosa desses pendores;
- A integração do declive da face da praia no método de previsão da profundidade de mistura permitiu a obtenção de uma formulação de aplicação generalizada, com bom ajuste, quer aos dados obtidos neste estudo, quer aos disponíveis na literatura. A existência de uma única equação para a previsão da profundidade de mistura constitui uma melhoria

relativamente ao estado de conhecimentos existente e possibilita um maior rigor na aplicação de formas de cálculo do transporte longilitoral onde esta variável seja utilizada.

*Principais lacunas registadas:*

- A obtenção de relações para a definição de transição barra/berma, que permitam uma avaliação efectivamente quantitativa, necessita de um mais vasto conjunto de dados, que possibilitem definir a associação entre os índices  $K$  e  $c$  e os valores diários de recuo/acreção;
- O rigor obtido na previsão do declive da face da praia foi relativamente baixo, indicando que os principais mecanismos forçadores podem não estar completamente integrados na formulação utilizada;
- A equação genérica obtida para a determinação da profundidade de mistura foi testada, de forma consistente, apenas para condições de energia baixa a moderada, sendo necessário um maior número de dados de campo em condições de energia elevada, para que se torne possível a sua aplicação com menor grau de erro, nessas condições.

#### 10.2.6. Morfodinâmica de mesoescala (temporais)

*Principais resultados obtidos:*

- O teste de dois modelos de previsão de erosão associada a temporais (MSBWT e convolução), para dois casos concretos (temporais de Fevereiro de 1989 e de Dezembro de 1992) permitiu verificar que estes modelos permitem a obtenção de resultados relativamente ajustados:
  - ◇ A variação entre previsões e resultados de campo no caso do modelo MSBWT foi de -5.6% a +52.7%, para os volumes médios de erosão calculados;
  - ◇ O volume máximo de erosão previsto por este método foi notoriamente superior (em média cerca de 100%) ao volume

- observado, pelo que se introduziu uma forma de correcção no modelo, adequada aos resultados obtidos para a área em estudo;
- ◇ O perfil de praia pós-temporal previsto pelo modelo MSBWT foi revisto e adequado à morfologia da zona em estudo, possibilitando um melhor ajuste entre previsões e observações de campo;
  - ◇ O modelo de convolução permitiu obter resultados positivos, com uma diferença média entre previsões e dados de campo de 18%, estando as variações máximas entre -47.3% e +58.6%. A aplicação perfil a perfil foi igualmente satisfatória, evidenciando que as dependências morfológicas e temporais do método são adequadas;
- A aplicação dos modelos a uma "tempestade média" hipotética, previamente definida, com perfil inicial da praia em situação média ou de Verão, não previu erosão dunar em qualquer dos locais analisados, ainda que nos locais mais frágeis tenha sido prevista uma redução acentuada das bermas;
  - A utilização de modelos considerando uma "tempestade centenária" hipotética (período de retorno de 100 anos) estimou uma erosão generalizada do cordão dunar frontal na área de estudo que levaria, inclusive, ao seu total desaparecimento nos locais mais frágeis. Neste cenário, seria igualmente provável a ocorrência de galgamentos e de inundações, com possível destruição de edificações;
  - Os modelos apresentados e testados permitirão efectuar, no futuro, a simulação de situações prováveis para o sector costeiro analisado, evidenciando as consequências da actuação de temporais específicos que se queiram reproduzir.

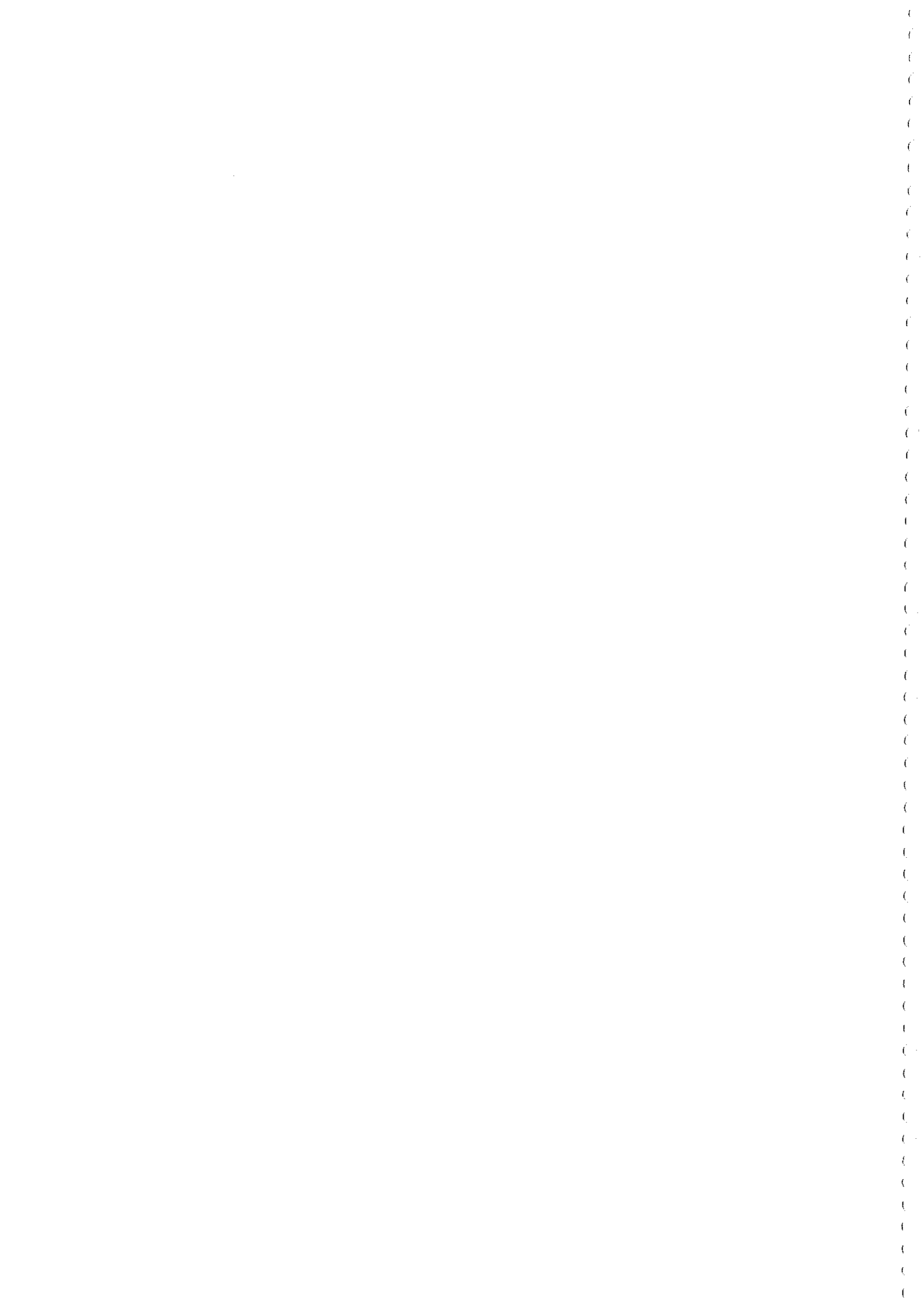
*Principais lacunas registadas:*

- O modelo MSBWT possui características de aplicação muito simples, não englobando a morfologia no cálculo dos volumes, pelo que não permite aplicações praia a praia. Os volumes de erosão determinados são apenas valores médios ou máximos, para uma região, e independentes da dimensão do sedimento, do pendor da praia, da morfologia do fundo e da altura da

onda, o que torna o problema e o resultado demasiado simplistas;

- O modelo de convolução é pouco sensível a variações na altura da onda, recorrendo a valores constantes de agitação para a totalidade do temporal. Este modelo recorre, ainda, ao declive do perfil inicial para a representação do perfil final, devendo ser introduzida uma melhoria no sentido de adequar o perfil pós-tempestade previsto ao que se observa no campo. Esta melhoria implica uma futura reformulação das equações utilizadas;
- A continuidade de aplicação e o aperfeiçoamento deste tipo de modelos deverá englobar o teste a casos específicos, com dados de campo, e com a introdução de melhorias nas suas previsões.

As conclusões mencionadas apresentam, para além do interesse científico inerente, a possibilidade de aplicação directa a actividades de gestão e conservação do litoral na área de estudo ou em áreas afins. Entre as aplicações deste trabalho salientam-se: a possibilidade de decidir quando e a que níveis deverá ocorrer intervenção na zona costeira; a definição de alguns parâmetros para a correcta execução de realimentações artificiais; a delimitação de áreas de risco ou elevada vulnerabilidade, nomeadamente em associação a temporais; e a determinação de áreas susceptíveis à ocorrência de galgamentos. Assim, espera-se que o trabalho efectuado venha a constituir um contributo positivo para a gestão e conservação costeira na área de estudo.



## **Referências bibliográficas**



- ABECASIS, C. K., 1955. The history of a tidal lagoon and its improvement (the case of Aveiro, Portugal). *5th Conference on Coastal Engineering*, 329-363.
- AHRENS, J., 1975. Wave runup on a 1 on 10 slope. *Miscellaneous paper n° 12-75*, CERC, 25 p.
- AHRENS, J., 1977. Prediction of irregular wave runup. *Coastal Engineering Technical Aid n° 77-2*, CERC, 14 p.
- ALONSO, I. e VILAS, F., 1994. The influence of boundary conditions on beach zonation. *Coastal Dynamics' 94*, 417-431.
- ANDRADE, C., 1990. *O ambiente de barreira da Ria Formosa. Algarve - Portugal*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 645 p.
- ANDRADE, C., TEIXEIRA, S., REIS, R. e FREITAS, C., 1996. The record of storminess of the Portuguese NW coast in newspaper sources. In: TAUSSIK, J. e MITCHELL, J. (eds), *Partnership in Coastal Zone Management*, Samara Publishing, 159-166.
- ÂNGELO, C., 1991. Taxas de variação do litoral oeste: uma avaliação temporal e espacial. *Comunicações do Seminário "A zona costeira e os problemas ambientais"*, EUROCOAST Portugal, 109-120.
- BALDOCK, T. E., HOLMES, P. e HORN, D. P., 1997. Low frequency swash motion induced by wave grouping. *Coastal Engineering*, 32, 197-222.
- BALSILLIE, J., 1983a. The transformation of the wave height during shore-breaking: the alpha wave peaking process. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 83-4*, Florida Department of Natural Resources, 33 p.
- BALSILLIE, J., 1983b. Wave crest elevation above the design water level during shore-breaking. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 83-5*, Florida Department of Natural Resources, 41 p.
- BALSILLIE, J., 1984a. Attenuation of wave characteristics following shore-breaking on longshore bars. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 84-3*, Florida Department of Natural Resources, 54 p.
- BALSILLIE, J., 1984b. A multiple shore-breaking wave transformation computer model. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 84-4*, Florida Department of Natural Resources, 81 p.
- BALSILLIE, J., 1985. Verification of the MSBWT numerical model: coastal erosion from four climatological events and littoral wave activity from three storm-damaged piers. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 85-2*, Florida Department of Natural Resources, 33 p.
- BALSILLIE, J., 1986. Beach and coast erosion due to extreme event impact. *Shore and Beach*, 54 (4), 22-37.

- BALSILLIE, J., 1997. Volumetric beach and coast erosion due to storm and hurricane impact. *Open File Report*, Florida Geological Survey, 22 p.
- BALSILLIE, J. e CARTER, R. W., 1984a. Observed wave data: the shore-breaker height. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 84-2*, Florida Department of Natural Resources, 70 p.
- BALSILLIE, J. e CARTER, R. W., 1984b. The visual estimation of shore-breaking wave heights. *Coastal Engineering*, 8, 367-385.
- BATTALIO, R., 1994. Estimating breaking wave height at Ocean Beach, San Francisco. *Shore and Beach*, 62 (4), 33-35.
- BATTJES, J. A., 1971. Run-up distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 97, ww1, 91-114.
- BATTJES, J. A., 1974. Surf similarity. *Coastal Engineering' 74*, 446-480.
- BATTJES, J. A., 1986. Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering 86-5*, Delft University of Technology, 18 p.
- BATTJES, J. A., 1988. Surf-zone dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics 1988*, 20, 257-293.
- BATTJES, J. A. e STIVE, M. J. F., 1985. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research*, 90, C5, 9159-9167.
- BAUER, B. O. e GREENWOOD, B., 1986. Surf-zone similarity. *Geographical Review*, 78, 2, 137-147.
- BETTENCOURT, P. e ÂNGELO, C., 1992. Faixa costeira centro oeste (Espinho - Nazaré): enquadramento geomorfológico e evolução recente. *Geonovas, n° Especial 1, A Geologia e o Ambiente*, 7-30.
- BIRKEMEIER, W. A., 1979. The effects of the 19 December 1977 coastal storm on beaches in North Carolina and New Jersey. *Shore and Beach*, 47, 7-15.
- BIRKEMEIER, W. A., 1985. Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111 (3), 598-602.
- BIRKEMEIER, W. A., KRAUS, N. C., SCHEFFNER, N. W. e KNOWLES, S. C., 1987. Feasibility study of quantitative erosion models for use by the Federal Emergency Management Agency in prediction of coastal flooding. *Technical Report CERC-87-8*, CERC, 102 p.
- BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., FORBES, D. L. e DRAPEAU, G., 1995. Nearshore bar

- development in southern gulf of St. Lawrence. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121 (1), 49-60.
- BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., JACKSON, L. A., FORBES, D. L., KOHLHASE, S. e NAGUSZEWSKI, A., 1993. Offshore bars and shore-zone dynamics. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference 1993*, vol.1, 405-413.
- BOON, J. D. e GREEN, M. O., 1988. Caribbean beach-face slopes and beach equilibrium profiles. *Coastal Engineering*' 88, 1618-1630.
- BOTO, A., 1997. *Evolução da zona costeira entre a Costa Nova do Prado e o Areão*. Tese de Mestrado (não publicada). Universidade de Aveiro, 179 p.
- BRADSHAW, B. E., HEALY, T. R., DELL, P. M. e BOLSTAD, W. M., 1991. Inner shelf dynamics on a storm-dominated coast, East Coromandel, New Zealand. *Journal of Coastal Research*, 7 (1), 11-30.
- CALLIARI, L. J. e KLEIN, A. H., 1993. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas*, 20 (1), 48-56.
- CAPITÃO, R. P., 1992. Síntese de dados de temporais ocorridos em Portugal Continental. *Relatório PO-WAVES 14/92-A*, IH/LNEC, 14 p.
- CARTER, R. W., 1988. *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. Academic Press, 609 p.
- CARTER, R. W. e BALSILLIE, J., 1983. A note on the amount of wave energy transmitted over nearshore sand bars. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 213-222.
- CARTER, R. W. e STONE, G. W., 1989. Mechanisms associated with the erosion of sand dune cliffs, Magilligan, Northern Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 1-10.
- CARVALHO, J. J. e BARCELÓ, J. P., 1966. Agitação marítima na costa oeste de Portugal metropolitano. *Memória nº 290*, LNEC, 34 p.
- CARVALHO, M. M., 1992. Valores extremos da agitação marítima, Figueira da Foz - tratamento local dos dados existentes. *Relatório PO-WAVES 13/92-A*, IH/LNEC, 108 p.
- CIAVOLA, P., TABORDA, R., FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1996. Longshore sand transport: a comparison between field observations and predictions of numerical models and implications for coastal erosion studies. In: TAUSSIK, J. e MITCHELL, J. (eds), *Partnership in Coastal Zone Management*, Samara Publishing, 185-193.
- CIAVOLA, P., TABORDA, R., FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1997a. Field observations of sand-mixing depths on steep beaches. *Marine Geology*, 141, 147-156.

- ClAVOLA, P., TABORDA, R., FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1997b. Field measurements of longshore sand transport and control processes on a steep meso-tidal beach in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 13 (4), 1119-1129.
- COSTA, C., 1994. Final report of sub-project A "Wind Wave Climatology of the Portuguese Coast". *Relatório PO-WAVES 6/94-A*, IHLNEC, 80 p.
- COSTA, M., 1987. Análise de um ano de dados de agitação marítima na Figueira da Foz. *Anais do Instituto Hidrográfico*, 8, 23-28.
- COSTA, M., 1993. Inventário de dados de agitação marítima. Medições efectuadas pelo Instituto Hidrográfico, volume 2. *Relatório PO-WAVES 5/93-A*, IHLNEC, 10 p. e anexos.
- COSTA, M., 1994a. Agitação marítima na costa portuguesa. *Anais do Instituto Hidrográfico*, nº 13, 35-40.
- COSTA, M., 1994b. Dados direccionais de agitação marítima na costa portuguesa. Relatório Final da Tarefa A1-5. *Relatório PO-WAVES 5/94-A*, IHLNEC, 29p. e anexos.
- DALLY, W. R., DEAN, R. G. e DALRYMPLE, R. A., 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. *Journal of Geophysical Research*, 90, C6, 11917-11927.
- DALRYMPLE, R. A., 1992. Prediction of storm/normal beach profiles. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 118 (2), 193-200.
- DEAN, R. G., 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics of the Coastal Zone*, 208-214.
- DEAN, R. G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Ocean Engineering Report nº 12*, University of Delaware, 45 p.
- DEAN, R. G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7 (1), 53-84.
- DEAN, R. G. e MAURMEYER, E. M., 1983. Models for beach profile response. In: KOMAR, P. (ed), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*, 151-165.
- DEVRIEND, H. J., 1991. G6 Coastal Morphodynamics. *Coastal Sediments' 91*, 356-370.
- DEWALL, A. E. e CHRISTENSEN, J., 1984. Guidelines for predicting maximum nearshore sand level changes on unobstructed beaches. *Miscellaneous Paper nº 84-4*, CERC, 43 p.
- DIAS, J. A., 1987. *Dinâmica sedimentar e evolução recente da plataforma continental portuguesa setentrional*. Tese de Doutoramento (não publicada), Universidade de

Lisboa, 384 p.

DOLAN, R. e DAVIS, R. E., 1994. Coastal storm hazards. In: FINKL, C. W. (ed), *Journal of Coastal Research, Special Issue n° 12, Coastal Hazards*, 103-114.

DOLAN, R. e HAYDEN, B., 1981. Storms and shoreline configuration. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 (3), 737-744.

DOUGLASS, S. L., 1992. Estimating extreme values of run-up on beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 118 (2), 220-224.

FERREIRA, Ó., 1991. Caracterização dos sedimentos superficiais da zona da praia submersa, com barra arenosa, entre Aveiro e o Cabo Mondego (resumo). *Livro de resumos do simpósio "A Plataforma Continental Portuguesa: evolução e processos condicionantes"*.

FERREIRA, Ó., 1993. *Caracterização dos principais factores condicionantes do balanço sedimentar e da evolução da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego*. Tese de Mestrado (não publicada), Universidade de Lisboa, 168 p.

FERREIRA, Ó., 1994. Beach erosion induced by storms: a tentative prevision for the Northwest Portuguese coast. *Gaia*, 8, 157-160.

FERREIRA, Ó., BAIROS, M., PEREIRA, H., CIAVOLA, P. e DIAS, J. A., 1998. Mixing depth levels and distribution on steep foreshores. In: FINKL, C. W. e BRUUN, P. (eds), *Journal of Coastal Research, Special Issue n° 26*, 292-296.

FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1991. Evolução recente de alguns troços do litoral entre Espinho e o Cabo Mondego. *Actas do 2º Simpósio sobre a Protecção e Valorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz*, IHRH, 85-95.

FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1992. Dune erosion and shoreline retreat between Aveiro and Cape Mondego (Portugal). Prediction of future evolution. In: STERR, H., HOFSTEDE, J. e PLAG, H. P. (eds), *Proceedings of the International Coastal Congress*, 187-200.

FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1997. Avaliação da acção de temporais na costa oeste portuguesa (sector Aveiro-Cabo Mondego). In: *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*, EUROCOAST Portugal, 429-447.

FERREIRA, Ó., DIAS, J. A., GAMA, C. e TABORDA, R., 1995. Quantification of beach erosion caused by storms on the Portuguese coast. In: HEALY, M. G. e DOODY, J. P. (eds), *Directions in European Coastal Management*, Samara Publishing, 267-273.

FERREIRA, Ó., DIAS, J. A. e TABORDA, R., 1994. Wave energy dissipation on a high energy barred nearshore: a natural and effective coastal protection. *Littoral' 94*, 369-379.

FERREIRA, Ó., MARTINS, J. T. e DIAS, J. A., 1997. Morfodinâmica e vulnerabilidade da

- Praia de Faro. In: *Seminário sobre a Zona Costeira do Algarve*, EUROCOAST Portugal, 67-76.
- FREDSØE, J. e DEIGAARD, R., 1992. Mechanics of Coastal Sediment Transport, *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 3, World Scientific, 366 p.
- FUCCELLA, J. E. e DOLAN, R., 1996. Magnitude of subaerial beach disturbance during northeast storms. *Journal of Coastal Research*, 12 (2), 420-429.
- GAMA, C. 1997. *Caracterização do fenómeno da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica em Portugal Continental. Efeito amplificador deste fenómeno sobre as variações volumétricas de sedimentos nas praias de Comporta, S. Torpes, Odeceixe e Arrifana*. Tese de Mestrado (não publicada). Universidade de Lisboa, 138 p.
- GAMA, C., DIAS, J. A., FERREIRA, Ó. e TABORDA, R., 1994a. Analysis of storm surge in Portugal, between June 1986 and May 1988. *Littoral' 94*, 381-387.
- GAMA, C., TABORDA, R. e DIAS, J. A., 1995. Factores condicionantes da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica, na estação maregráfica de Viana do Castelo. *Memórias n° 4*, IV Congresso Nacional de Geologia, Universidade do Porto, 189-193.
- GAMA, C., TABORDA, R., DIAS, J. A. e FERREIRA, Ó., 1994b. Return periods of extreme sea levels in Portugal. *Gaia*, n° 8, 59-61.
- GAUGHAN, M. K., 1978. Depth of disturbance of sand in surf zones. *Coastal Engineering' 78*, 1513-1530.
- GIBBS, R. J., MATTHEWS, M. D. e LINK, D. A., 1971. The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41 (1), 7-18.
- GIRÃO, A., 1941. Formas litorais. In: GIRÃO, A. (ed), *Geografia de Portugal*, Portucalense Editora, 93-120.
- GOURLAY, M. R., 1992. Wave set-up, wave run-up and beach water table: interaction between surf zone hydraulics and groundwater hydraulics. *Coastal Engineering*, 17, 93-144.
- GREENWOOD, B. e HALE, P. B., 1980. Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred nearshore environment. In: MCCANN, S. B. (ed), *Proceedings of the Conference The Coastline of Canada*. Geological Survey of Canada, 89-109.
- GUZA, R. T. e INMAN, D. L., 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 80 (21), 1328-1342.
- GUZA, R. T. e THORNTON, E. B., 1982. Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 87, C1, 483-491.

HALLERMEIER, R., 1981a. Seaward limit of significant sand transport by waves: an annual zonation for seasonal profiles. *Coastal Engineering Technical Aid*, nº 81-2, CERC, 23 p.

HALLERMEIER, R., 1981b. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277.

HARDY, T. A. e YOUNG, I. R., 1996. Field study of wave attenuation on an offshore coral reef. *Journal of Geophysical Research*, 101, C6, 14311-14326.

HÉQUETTE, A. e HILL, P. R., 1993. Storm-generated currents and offshore sediment transport on a sandy shoreface, Tibjak Beach, Canadian Beaufort Sea. *Marine Geology*, 113, 283-304.

HOLLAND, K. T., RAUBENHEIMER, B., GUZA, R. T. e HOLMAN, R. A., 1995. Runup kinematics on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 100, C3, 4985-4993.

HOLMAN, R. A., 1986. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9, 527-544.

HOLMAN, R. A. e BOWEN, A. J., 1982. Bars, bumps and holes: models for the generation of complex beach topography. *Journal of Geophysical Research*, 87, C1, 457-468.

HOLMAN, R. A. e SALLENGER, A. H., 1985. Setup and swash on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 90, C1, 945-953.

HORN, D., 1993. Sediment dynamics on a macrotidal beach: Isle of Man. *Journal of Coastal Research*, 9 (1), 189-208.

HUGHES, M. G., 1992. Application of a non-linear shallow water theory to swash following bore collapse on a sandy beach. *Journal of Coastal Research*, 8 (3), 562-578.

HUNT, I. A., 1959. Design of seawalls and breakwaters. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 85, ww3, 123-152.

HSU, T. e WANG, H., 1997. Geometric characteristics of storm beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 13 (4), 1102-1110.

INMAN, D. L., 1963. Ocean waves and associated currents. In: Sheppard, F. P. (ed), *Submarine Geology*, Harper & Row, 49-81.

INMAN, D. L. e BAGNOLD, R. A., 1963. Littoral processes. In: HILL, M. (ed), *The Sea*, vol. III, Wiley Interscience, 529-553.

INMAN, D. L., ELWANY, M. H. e JENKINS, S. A., 1993. Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *Journal of Geophysical Research*, 98, C10, 18181-18199.

- INMAN, D. L., ZAMPOL, J. A., WHITE, T. E., HANES, D. M., WALDORF, B. W. e KASTENS, K. A., 1980. Field measurements of sand motion in the surf zone. *Coastal Engineering' 80*, 1215-1234.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1989. Tratamento de dados - Agitação marítima, Figueira da Foz, Estação CSA-91, Tempestade de 24 Fev 89 a 28 Fev 89. *Relatório TP-CE-22/89*, IH.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1993. Tratamento de dados - Agitação marítima, Figueira da Foz, Estação CSA-91/D, Outubro a Dezembro de 1992. *Relatório TP-OM-05/93*, IH.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 1996. *Tabela de Marés, volume I, Portugal*, IH.
- JACKSON, N. L. e NORDSTROM, K. F., 1993. Depth of activation of sediment by plunging breakers on a steep sandy beach. *Marine Geology*, 115, 143-151.
- JACOB, J. M., 1994. *Modelo unidimensional para geração de correntes longitudinais na zona de rebentação por acção de agitação irregular*. Tese de Mestrado (não publicada), Universidade Técnica de Lisboa, 140 p.
- JIMÉNEZ, J. A., SANCHEZ-ARCILLA, A. e STIVE, M. J., 1993. Prediction of storm/normal beach profiles (Discussion). *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119, 4, 466-474.
- JOHNSON, J. W., 1949. Scale effects in hydraulic models involving wave motion. *Transactions of the American Geophysical Union*, 30, 4, 517-525.
- JOHNSON, J. W., 1952. Sand transport by littoral currents. *Proceedings of the Fifth Hydraulics Conference*, 89-109.
- KAMPHUIS, J. W., 1994. Wave height from deep water through breaking zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120 (4), 347-367.
- KEADY, D. M. e COLEMAN, J. L., 1980. Incidence, breaking and reforming of waves behind submerged barriers. In: TANNER, W. F. (ed), *Shorelines, Past and Present, Proceedings of the Fifth Symposium on Coastal Sedimentology*, Florida, 249-267.
- KEMP, P. H., 1963. A field study of wave action on natural beaches. *Proc. 10th Meeting International Association of Hydraulics Researchers*, 131-138.
- KING, C. A. M., 1951. Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves. *Journal of Sedimentary Petrology*, 21, 131-140.
- KOBAYASHI, N., 1987. Analytical solution for dune erosion by storms. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 113 (4), 401-418.
- KOBAYASHI, N., 1988. Review of wave transformation and cross-shore sediment

- transport processes in surf zones. *Journal of Coastal Research*, 4 (3), 435-445.
- KOBAYASHI, N., STRZELECKI, M. S. e WURJANTO, A., 1988. Swash oscillation and resulting sediment movement. *Coastal Engineering' 88*, 1167-1181.
- KOBAYASHI, N. e WURJANTO, A., 1992. Irregular wave setup and run-up on beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118 (4), 368-386.
- KOMAR, P., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice - Hall, New Jersey, 429 p.
- KOMAR, P., 1983. Beach processes and erosion - an introduction. In: KOMAR, P. (ed), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*, 1-20.
- KOMAR, P. e GAUGHAN, M. K., 1972. Airy wave theory and breaker height prediction. *Coastal Engineering' 72*, 405-418.
- KOMAR, P. D. e INMAN, D. L., 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 75, 5514-5527.
- KOMAR, P., MCDUGAL, W. G. e RUGGIERO, P., 1996. Beach erosion at Brookings - causes and mitigation. *Shore and Beach*, 64 (2), 17-27.
- KRAUS, N. C., 1985. Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55, 3-14.
- KRAUS, N. C., ISOBE, M., IGARASHI, H., SASAKI, T. O. e HORIKAWA, K., 1982. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. *Coastal Engineering' 82*, 970-988.
- KRAUS, N. C. e MASON, J. M., 1993. Prediction of storm/normal beach profiles (Discussion). *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119, 4, 466-474.
- KRIEBEL, D. L., 1984a. Beach erosion model (EBEACH) users manual, volume I: Description of computer model. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 84-5-I*, Florida Department of Natural Resources, 25 p.
- KRIEBEL, D. L., 1984b. Beach erosion model (EBEACH) users manual, volume II: Theory and background. *Beaches and Shores Technical and Design Memorandum n° 84-5-II*, Florida Department of Natural Resources, 72 p.
- KRIEBEL, D. L., 1986. Verification of a dune erosion model. *Shore and Beach*, 54 (3), 13-21.
- KRIEBEL, D. L., DALLY, W. R. e DEAN, R. G., 1986. Undistorted Froude model for surf zone sediment transport. *Coastal Engineering' 86*, 1296-1310.
- KRIEBEL, D. L. e DEAN, R. G., 1985. Numerical simulation of time-dependent beach

- and dune erosion. *Coastal Engineering*, 9, 221-245.
- KRIEBEL, D. L. e DEAN, R. G., 1993. Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119 (2), 204-226.
- LARANJEIRA, M., 1997. *Vulnerabilidade e gestão dos sistemas dunares. O caso das dunas de Mira*. Tese de Mestrado (não publicada). Universidade Nova de Lisboa, 104 p.
- LARSON, M. e KRAUS, N. C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1, Empirical foundation and model development. *Technical Report CERC-89-9, Report 1*, CERC, 267 p.
- LARSON, M. e KRAUS, N. C., 1992. Analysis of cross-shore movement of natural longshore bars and material placed to create longshore bars. *Technical Report DRP-92-5*, Dredging Research Program, US Army Corps of Engineers, 115 p.
- LARSON, M. e KRAUS, N. C., 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Marine Geology*, 117, 75-94.
- LARSON, M. e KRAUS, N. C., 1995. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine Geology*, 126, 111-127.
- LARSON, M., KRAUS, N. C. e BYRNES, M. R., 1990. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 2, Numerical formulation and model tests. *Technical Report n° 89-9, Report 2*, CERC, 121 p.
- LARSON, M., KRAUS, N. C. e SUNAMURA, T., 1988. Beach profile change: morphology, transport rate, and numerical simulation. *Coastal Engineering* '88, 1295-1309.
- LE MEHAUTE, B. e WANG, J., 1980. Transformation of monochromatic waves from deep to shallow water. *Technical Report n° 80-2*, CERC, 43 p.
- LEE, C. E., KIM, M. H. e EDGE, B., 1996. Numerical model for on-offshore sediment transport with moving boundaries. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 122 (2), 84-92.
- LEE, G. H., NICHOLLS, R. J., BIRKEMEIER, W. A. e LEATHERMAN, S. P., 1995. A conceptual fairweather-storm model of beach nearshore profile evolution at Duck, North Carolina, USA. *Journal of Coastal Research*, 11 (4), 1157-1166.
- LEENKNECHT, D. A., SZUWALSKI, A. S. e SHERLOCK, A., 1992. *Automated Coastal Engineering System, Technical Reference, Version 1.07.*, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- LINS, H. F., 1985. Storm-generated variations in nearshore beach topography. *Marine Geology*, 62, 13-29.

- MALLAYACHARI, V. e SUNDAR, V., 1996. Wave transformation over submerged obstacles in finite water depths. *Journal of Coastal Research*, 12 (2), 477-483.
- MARTINS, F., 1946. A configuração do litoral português no último quartel do século XIV. *Biblos*, XXII (1), 13-29.
- MARTINS, J. T., FERREIRA, Ó., CIAVOLA, P. e DIAS, J. A., 1996. Monitoring of profile changes at Praia de Faro, Algarve: a tool to predict and solve problems. In: TAUSSIK, J. e MITCHELL, J. (eds), *Partnership in Coastal Zone Management*, Samara Publishing, 615-622.
- MARTINS, J. T., FERREIRA, Ó. e DIAS, J. A., 1997. A susceptibilidade da Praia de Faro à erosão por tempestades. *Comunicações do 9º Congresso do Algarve*, Racal Clube, 206-213.
- MASSELINK, G., 1994. *Morphodynamics of macrotidal beaches: examples from central Queensland, Australia*. Tese de doutoramento (não publicada), University of Sidney, 270 p.
- MASSELINK, G., e HEGGE, B., 1995. Morphodynamics of meso and macrotidal beaches: examples from central Queensland, Australia. *Marine Geology*, 129, 1-23.
- MASSELINK, G., e SHORT, A. D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9 (3), 785-800.
- MAYER, R. H. e KRIEBEL, D. L., 1994. Wave runup on composite-slope and concave beaches. *Coastal Engineering '94*, 2325-2339.
- MELO, E., 1993. The Sea Sentinels Project: watching waves in Brazil. *Coastal Zone* 93, 505-517.
- MORAIS, C. e ABECASIS, F., 1978. Storm surge effects at Leixões. *Memória nº 503*, LNEC, 23 p.
- MORTON, R. A., GIBEAUT, J. C. e PAINE, J. G., 1995. Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology*, 126, 161-179.
- MUNK, W., 1949. The solitary wave theory and its application to surf problems. *Annals of New York Academy of Sciences*, 51, 376-424.
- NIELSEN, P. e HANSLOW, D. J., 1991. Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 7, 4, 1139-1152.
- NOIVO, L., 1996. *Morfologia e dinâmica sedimentar das dunas de Quiaios, Portugal*. Tese de Mestrado (não publicada). Universidade de Aveiro, 172 p.

- OELERICH, J. e DETTE, H. H., 1988. About the energy dissipation over barred beaches. *Coastal Engineering* '88, 292-306.
- OKAZAKI, S. e SUNAMURA, T., 1991. Re-examination of breaker-type classification on uniformly inclined laboratory beaches. *Journal of Coastal Research*, 7 (2), 559-564.
- OLIVEIRA, I. M., VALLE, A. J. e MIRANDA, F. C., 1982. Littoral problems in the Portuguese West coast. *Coastal Engineering* '82, 1950-1969.
- OVERTON, M. F. e FISHER, J. S., 1988. Simulation modeling of dune erosion. *Coastal Engineering* '88, 1857-1867.
- PINTO, L., 1993. *Morfosedimentogénese e ambiente da Ria de Mira, Aveiro-Portugal*. Tese de Mestrado (não publicada), Universidade de Lisboa, 186 p.
- PIRES, H. N. e PESSANHA, L. E., 1986a. Wave power climate of Portugal. In: EVANS, D. e FALCÃO A. (eds), *Hydrodynamics of Ocean Wave-energy Utilization*, IUTAM Symposium, Lisboa, 157-167.
- PIRES, H. N. e PESSANHA, L. E., 1986b. Estima da distribuição de probabilidades dos valores extremos, utilizando séries climatológicas curtas. *Revista do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica*, 25 p.
- PITA, C., CARVALHO, M., SANTOS, J., VELOSO, E., DAMIÃO, A. e BOTELHO, L., 1987. Agitação marítima na costa portuguesa. Dados de base. Temporais. *Relatório conjunto DGP-LNEC*, 17 p.
- PITA, C. e SANTOS, J., 1989. Análise dos temporais da costa oeste de Portugal Continental. *Relatório PO-WAVES 1/89-A*, IH/LNEC, 29 p.
- PLANT, N. G. e GRIGGS, G. B., 1992. Comparison of visual observation wave height and period to measurements made by an offshore slope array. *Journal of Coastal Research*, 8 (4), 957-965.
- PUREZA, F. G. e ARAÚJO, A. M., 1956a. Granulometria e minerais pesados das areias das praias entre o Porto e a Figueira da Foz. *Memórias e Notícias*, 41, 3-7.
- PUREZA, F. G. e ARAÚJO, A. M., 1956b. Contribution à l'étude des sables des plages du Nord du Portugal. *Memórias e Notícias*, 42, 3-25.
- RAUBENHEIMER, B., GUZA, R. T., ELGAR, S. e KOBAYASHI, N., 1995. Swash on a gently sloping beach. *Journal of Geophysical Research*, 100, C5, 8751-8760.
- RECTOR, R. L., 1954. Laboratory study of equilibrium profiles of beaches. *Technical Memorandum n° 41*, CERC, 38 p.
- ROELVINK, J. A., 1993. Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.

- ROELVINK, J. A. e BRÖKER, I., 1993. Cross-shore profile models. *Coastal Engineering*, 21, 163-191.
- RUSSEL, P., 1993. Mechanisms for beach erosion during storms. *Continental Shelf Research*, 13 (11), 1243-1265.
- SARGENT, F. E. e BIRKEMEIER, W. A., 1985. Application of the dutch method for estimating storm-induced dune erosion. *Instruction Report CERC-85-2*, CERC, 42 p.
- SCHNEIDER, C., 1977. Visual surf observations/Marineland experiment. *Coastal Sediments' 77*, ASCE, 1086-1100.
- SCHOONEES, J. S. e THERON, A. K., 1995. Evaluation of 10 cross-shore sediment transport/morphological models. *Coastal Engineering*, 25, 1-41.
- SEYMOUR, R. J. e CASTEL, D., 1988. Validation of cross-shore transport formulations. *Coastal Engineering' 88*, 1676-1687.
- SHERMAN, D. J., NORDSTROM, K. F., JACKSON, N. L. e ALLEN, J. R., 1994. Sediment mixing-depths on a low-energy reflective beach. *Journal of Coastal Research*, 10 (2), 297-305.
- SHERMAN, D. J., SHORT, A. D. e TAKEDA, I., 1993. Sediment mixing-depth and bedform migration in rip channels. In: SHORT, A. D. (ed), *Journal of Coastal Research*, Special Issue 15, Beach and Surf Zone Morphodynamics, 39-48.
- SHORT, A. D., 1992. Beach systems of the central Netherlands coast: processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system. *Marine Geology*, 107, 103-137.
- SILVESTER, R. e HSU, J. R., 1997. *Coastal Stabilization*. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 14, World Scientific, 578 p.
- SMITH, E. R. e WAGNER, S. E., 1991. Littoral Environment Observation Program. *Journal of Coastal Research*, 7 (3), 595-605.
- SMITH, W. G., ROSATI, J. e LEMIRE, A., 1993. Revere Beach and Point of Pines, Massachusetts, shore front study. In: STAUBLE, D. K. and KRAUS, N. (eds), *Beach Nourishment Engineering and Management Considerations*, ASCE, 118-132.
- SONU, C. J., PETTIGREW, N. e FREDERICKS, R. G., 1974. Measurement of swash profile and orbital motion on the beach. *Ocean Wave Measurement and Analysis, Waves' 74*, 621-638.
- STAUBLE, D. K., 1992. Long-term profile and sediment morphodynamics: field research facility case history. *Technical Report CERC-92-7*, CERC, 252 p.
- SUHAYDA, J. N. e ROBERTS, H. H., 1977. Wave action and sediment transport on fringing reefs. *Proceedings Third International Coral Reef Symposium*, 65-70.

- SUNAMURA, T., 1984. Quantitative predictions of beach-face slopes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 242-245.
- SUNAMURA, T., 1989. Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling. In: LAKHAN, V. C. e TRENHAILE, A. S. (eds), *Applications in Coastal Modelling, Elsevier Oceanography Series*, 49, 159-213.
- SUNAMURA, T. e KRAUS, N. C., 1985. Prediction of average mixing depth of sediment on the surf zone. *Marine Geology*, 62, 1-12.
- SUNAMURA, T. e OKAZAKI, S., 1996. Breaker types and wave reflection coefficient: laboratory relationships. *Journal of Coastal Research*, 12 (1), 240-245.
- SUNAMURA, T. e TAKEDA, I., 1984. Landward migration of inner bars. *Marine Geology*, 60, 63-78.
- SUNAMURA, T. e TAKEDA, I., 1993. Bar movement and shoreline change: predictive relations. In: SHORT, A. D. (ed), *Journal of Coastal Research, Special Issue n° 15, Beach and Surf Zone Morphodynamics*, 125-140.
- TABORDA, R., 1993. *Modelação da dinâmica sedimentar induzida pela ondulação na plataforma continental portuguesa*. Tese de Mestrado (não publicada), Universidade de Lisboa, 126 p.
- TABORDA, R. e DIAS, J. A., 1992. Análise da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fev/Mar de 1978 e Dez de 1981. *Geonovas, n° Especial 1, A Geologia e o Ambiente*, 89-98.
- TAKEZAWA, M., MIZUGUCHI, M., HOTTA, S. e KUBOTA, S., 1988. Wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering' 88*, 151-165.
- TEIXEIRA, S., 1990. *Dinâmica das praias da Península de Setúbal (Portugal)*. Tese de Mestrado (não publicada), Universidade de Lisboa, 189 p.
- TEIXEIRA, S., 1994. *Dinâmica morfossedimentar da Ria de Aveiro (Portugal)*. Tese de doutoramento (não publicada), Universidade de Lisboa, 396 p.
- TOMÁS, J., 1995. *Caracterização morfológica e textural do litoral entre Espinho e Cabo Mondego (Portugal)*. Tese de Mestrado (não publicada), Universidade de Lisboa, 195 p.
- VAN DE GRAAFF, J., 1986. Probabilistic design of dunes: an example from the Netherlands. *Coastal Engineering*, 9, 479-500.
- VAN DE GRAAFF, J., 1994. Coastal and dune erosion under extreme conditions. In: FINKL, C. W. (ed), *Journal of Coastal Research, Special Issue n° 12, Coastal Hazards*, 253-262.

VANNEY, J. R. e MOUGENOT, D., 1981. La plate-forme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: analyse geomorphologique. *Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal n° 28*, 145 p.

VELLINGA, P., 1982. Beach and dune erosion during storm surges. *Publication n° 276*, Delft Hydraulics, 31 p.

VERA-CRUZ, D., 1962. Ondas na rebentação. *Memória n° 199*, LNEC, 16 p.

WALTON, T. L., 1993. Ocean City, Maryland, wave runup study. *Journal of Coastal Research*, 9 (1), 1-10.

WATANABE, A. e DIBAJNIA, M., 1988. A numerical model of wave deformation in surf zone. *Coastal Engineering '88*, 578-587.

WILLIAMS, A. T., 1971. An analysis of some factors involved in the depth of disturbance of beach sand by waves. *Marine Geology*, 11, 93-118.

WINANT, C. D., INMAN, D. L. e NORDSTROM, C. E., 1975. Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, 80 (15), 1625-1632.

WISE, R. A. e KRAUS, N. C., 1993. Simulation of beach fill response to multiple storms, Ocean City, Maryland. In: STAUBLE, D. K. and KRAUS, N. C. (eds), *Beach Nourishment Engineering and Management Considerations*, ASCE, 133-147.

WRIGHT, L. D. e SHORT, A. D., 1983. Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia. In: KOMAR, P. (ed), *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*, 35-64.

WRIGHT, L. D. e SHORT, A. D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.

WRIGHT, L. D., SHORT, A. D. e GREEN, M. O., 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical predictive model. *Marine Geology*, 62, 339-364.

