

**IMPACTE DA EROSÃO LOCALIZADA POTENCIADA POR
CHEIAS PÓS-INCÊNDIO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL
DE PILARES DE PONTES**

Soraia Beatriz Cruz de Almeida

**Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Estruturas
Dissertação**

ORIENTADOR(ES): Doutor Rui Miguel Madeira Lança
Doutor Rui Carlos Gonçalves Graça e Costa

dezembro de 2015
Dissertação submetida na Universidade do Algarve

Uma acumulação de factos não faz uma ciência, tal como um conjunto de pedras não faz uma casa

Jules Henri Poincaré

AGRADECIMENTOS

Ao meu namorado, Rui Andrade, pela força, presença e dedicação, acreditando em mim até ao fim.

Aos meus pais, avó e irmãos, pelo apoio e afeto e aos meus sobrinhos, por todos os sorrisos largados.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Rui Lança e Professor Doutor Rui Costa, e professores que contribuíram para a concretização deste trabalho, pelas horas despendidas, por todo o trabalho realizado em conjunto e por todo o progresso, crescimento e descoberta concretizada.

Aos meus amigos, pelas palavras e momentos oferecidos, colocando sempre em mim o pensamento e a certeza de que iria conseguir.

RESUMO

Os incêndios florestais alteram as propriedades dos solos devido às temperaturas elevadas, depósito de cinzas e de outros compostos voláteis, contribuindo para a diminuição da taxa de infiltração potencial, diminuição da retenção de água na bacia hidrográfica e para a ocorrência de cheias mais severas e com maior impacte sobre as estruturas construídas pelo homem.

Este estudo tem como objetivo a caracterização da variação induzida por um incêndio, nas propriedades hidráulicas de um solo. Com este propósito, recolheram-se 4 amostras de solo não perturbado, no litoral do Algarve (Ludo), sendo que em 3 das 4 amostras de solo foi queimado diferentes quantidades de material combustível, constituído por vegetação autóctone, simulando-se o incêndio. Na análise de resultados também foram considerados os ensaios apresentados por Lança *et al.* (2014) em solos da serra Algarvia.

Após a simulação de incêndio em laboratório, foram realizados ensaios com infiltrómetro de duplo anel, de modo a determinar a condutividade hidráulica quase saturada, k_s , a sorvidade, S , e o potencial matricial do solo, ψ , e curva número, CN , através da correlação das curvas de infiltração observadas, com os modelos de Philips, Green-Ampt e curva número do Soil Conservation Service.

Neste estudo utilizou-se o modelo *Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System* (HEC HMS) para simular a resposta hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Séqua em cenário pré-incêndio e pós-incêndio. Os solos foram caracterizados de acordo com a carta de solos de Portugal e os usos determinados com base na carta de uso e ocupação do solo de Portugal. Para além disso, foram identificadas as áreas queimadas pelo incêndio de Catraia em 2012, avaliada a severidade do incêndio, determinada a biomassa acima do solo, bem como a precipitação efetiva para a geração de escoamento superficial.

Os resultados obtidos revelam que os caudais de ponta de cheia podem ter um incremento de aproximadamente 25% nas sub-bacias hidrográficas onde o incêndio de Catraia teve efeitos mais severos.

Seguidamente, foi determinada a profundidade máxima da cavidade de erosão de uma estrutura relativa a uma ponte, com recurso ao código *Hydrologic Engineering Circular No.18* (HEC-18) e analisou-se o comportamento estrutural da mesma com recurso ao programa de cálculo de análise estrutural por elementos finitos, SAP 200 V.17, antes e em diversas fases do desenvolvimento do processo erosivo junto a um pilar da ponte.

PALAVRAS-CHAVE: incêndios, infiltração, bacias hidrográficas, erosão, pontes.

ABSTRACT

Forest fires modify the soil modification due to exposure to high temperatures, deposit of ashes and other volatiles, contributing to reduce the potential infiltration rate, water retention on the hydrographyc basin and to more sever floods with increasing impacts on the man-made structures.

This study aims the characterization variation of the hydraulic properties of the soils induced by florest fires. For this purpose, 4 undisturbed soil samples were collected on the Algarve Littoral (Ludo). On 3 of the 4 samples of soil were burned different amounts of combustible material consisting of indigenous vegetation, by simulating fire. On the result analissis were used resultas od laboratory tests carried out by Lança *et al.* (2014).

After the fire simulation tests were carried out infiltration tests with double ring infiltrometer, to obtain the almost saturated hydraulic conductivity, k_s , sorptivity, S , potential of the soil, ψ , and curve number, CN , by the fit of the observed infiltration curves observed to the models of Philips, Green-Ampt and Soil Conseration Service Curve Number.

The *Hydrologic Engineering Center -Hydrologic Modeling System* (HEC HMS) was used to model the hydrological response of the watershed of the Rio Séqua on pre-fire and post-fire scenarios. The soils were characterized according to *Carta de solos de Portugal* and the soil uses were classified according of the *Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal*. Additionally, were identified the burned areas on the Catraia Fire in 2012, the severity of the fire was evaluated, the above-ground biomass was obtained, so as the effective precipitation for runoff generation.

The results reveal that the peak flows may increase by 25% on the sub-basins were the Catraia fire was more severe.

The maximum scour depth was predicted by the Hydrologic Engineering Circular No.18 (HEC-18) and the structural analysis of the bridge was carried out by applying the finite element software, SAP 200 V.17., before and also on different stages of the scour hole development near one pier of the bridge.

KEYWORDS: forest fires, Infiltration, hydrographic basin, scouring, bridges.

ÍNDICE GERAL

CITAÇÃO	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. ORGANIZAÇÃO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. PROPRIEDADES DOS SOLOS	6
2.2.1. ESTRUTURA.....	6
2.2.2. Porosidade.....	6
2.2.3. Textura	6
2.2.4. Matéria Orgânica	6
2.2.5. Densidade das partículas.....	7
2.2.6. Humidade	7
2.3. O EFEITO DO CALOR E DA CINZA NA MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS	7
2.4. O CICLO HIDROLÓGICO	10

2.4.1. BACIA HIDROGRÁFICA	11
2.4.2. PROCESSOS DO CICLO HIDROLÓGICO	11
2.5. MODELOS DE INFILTRAÇÃO	13
2.5.1. EQUAÇÃO DE HORTON	13
2.5.2. EQUAÇÃO DE PHILLIPS	14
2.5.3. MÉTODO DE GREEN-AMPT.....	14
2.6. MÉTODO DA CURVA NÚMERO	16
2.7. O USO DO MÉTODO DA CURVA NÚMERO EM CENÁRIOS PÓS-INCÊNDIO	21
2.8. MÉTODO DE ONDA CINEMÁTICA	22
2.9. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA – HEC-HMS.....	23
2.10. EROÇÃO LOCALIZADA DE PILARES	24
2.10.1. INTRODUÇÃO	24
2.10.2. HEC-18-AVALIAÇÃO DA EROÇÃO EM PONTES.....	26
3. PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DOS SOLOS ..	27
3.1. ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE E DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	27
3.1.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	28
3.1.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	28
3.1.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	29
3.1.3.1. Solos do Litoral Algarvio.....	29
3.1.3.2. Solos da Serra Algarvia.....	31
3.2. ENSAIO GRANULOMÉTRICO POR PENEIRAÇÃO HÚMIDA	32
3.2.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	32
3.2.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	32
3.2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	33

3.2.3.1. Solos do Litoral Algarvio	33
3.2.3.2. Solos da Serra Algarvia	34
3.3. ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA POROSIDADE DO SOLO.....	34
3.3.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	34
3.3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	35
3.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	36
3.3.3.1. Solos do Litoral Algarvio	38
3.3.3.2. Solos da Serra Algarvia	38
3.4. ENSAIO DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS PARTÍCULAS DO SOLO.....	39
3.4.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	39
3.4.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	39
3.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	41
3.4.3.1. Solos do Litoral Algarvio	41
3.4.3.2. Solos da Serra Algarvia	41
3.5. ENSAIO GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTAÇÃO	42
3.5.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	42
3.5.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	42
3.5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	45
3.5.3.1. Solos do Litoral Algarvio	45
3.5.3.2. Solos da Serra Algarvia	46
3.6. ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO	49
3.6.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	50
3.6.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	50
3.6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	50
3.6.3.1. Solos do Litoral Algarvio	50

3.7. ENSAIO DE INFILTRAÇÃO	52
3.7.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS.....	52
3.7.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	52
3.7.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	53
3.7.3.1. Solos do Litoral Algarvio.....	53
4. MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS DEVIDO AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS	55
4.1. INTRODUÇÃO	55
4.2. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS PARA OS SOLOS DO LITORAL ALGARVIO	56
4.3. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS PARA OS SOLOS DA SERRA ALGARVIA ...	59
4.4. RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS NOS SOLOS DO LITORAL ALGARVIO	60
4.5. RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS NOS SOLOS DA SERRA ALGARVIA ..	65
5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS INCÊNDIOS NO LITORAL ALGARVIO - AVALIAÇÃO BASEADA NA CURVA NÚMERO	71
5.1. INTRODUÇÃO	71
5.2. MÉTODO DA CURVA NÚMERO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)	71
5.3. CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO E A CURVA NÚMERO.	72
5.4. CÁLCULO DO CN PARA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DO ALPORTEL	81
6. EFEITO DO INCENDIO NA RESPOSTA HIDROLOGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	87
6.1. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÉQUA	87
6.1.1. LOCALIZAÇÃO DA BACIA.....	87
6.1.2. GEOMORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA	87

6.1.3. PEDOLOGIA DA BACIA.....	90
6.1.4. USOS DO SOLO.....	94
6.1.5. CLASSES DE INFILTRAÇÃO.....	97
6.1.6. ÍNDICE DNBR.....	97
6.1.7. ÍNDICE NDVI.....	100
6.1.8. BIOMASSA.....	101
6.1.9. REDE HIDROGRÁFICA DA BACIA.....	104
6.2. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA.....	106
6.2.1. HEC-HMS.....	106
6.2.2. MODELO HIDROLÓGICO.....	106
6.2.3. PARÂMETROS PARA A MODELAÇÃO.....	107
6.2.4. PRECIPITAÇÃO.....	109
6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	110
6.3.1. CENÁRIO PRÉ-INCÊNDIO.....	110
6.3.2. CENÁRIO PÓS-INCÊNDIO.....	111
6.3.2.1. Cenário pós incêndio em Agosto de 2012.....	112
6.3.2.2. Cenário pós incêndio em Agosto de 2013.....	113
6.3.2.3. Cenário pós incêndio em Agosto de 2014.....	114
7. EFEITO DA EROÇÃO LOCALIZADA NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PONTES.....	117
7.1. INTRODUÇÃO.....	117
7.2. ESTRUTURA EM ANÁLISE.....	117
7.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA.....	117
7.2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS.....	119

7.3. AÇÕES ATUANTES SOBRE A ESTRUTURA	119
7.3.1. SOBRECARGA	119
7.3.2. AÇÃO DO VENTO	119
7.3.2.1. Ação do vento no tabuleiro da ponte	120
7.3.2.2. Ação do vento nos pilares da ponte	121
7.3.3. AÇÃO SÍSMICA	122
7.4. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS	124
7.5. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CAVIDADE DE EROSÃO	124
7.5.1. DESCRIÇÃO DO ESCOAMENTO JUNTO A UM PILAR	124
7.5.2. Variáveis que influenciam o processo erosivo	125
7.5.3. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE EROSÃO JUNTO A UM PILAR SIMPLES	127
7.5.4. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE EROSÃO JUNTO A UM PILAR COMPLEXO	129
7.5.5. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE EROSÃO JUNTO A UM PILAR COMPLEXO NUMA CHEIA PÓS-INCÊNDIO	133
7.6. RESULTADOS OBTIDOS ESTRUTURALMENTE DEVIDOS AO DESCALÇAMENTO DA FUNDAÇÃO	135
7.7. CONCLUSÕES	143
8. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	145
8.1. CONCLUSÕES	145
8.2. TRABALHO FUTURO	146
9. BIBLIOGRAFIA	149
ANEXOS	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Variáveis do modelo de infiltração de Green-Ampt, adaptado de Chow <i>et al.</i> (1988)	15
Fig.2.2 – Subtração da infiltração de um evento de precipitação, através do uso de equações físicas. (1 polegada = 25.4 mm), adaptado de Chow <i>et al.</i> (1988)	17
Fig.2.3 – Variáveis do método SCS para subtração da precipitação, adaptado de Chow <i>et al.</i> (1988)	18
Fig.2.4 – Solução da equação do método SCS para o escoamento, adaptado de Chow <i>et al.</i> (1988)	19
Fig.2.5 – Valores de $CN_{pré-incêndio}$ e $CN_{pós-incêndio}$ em função da severidade do incêndio, adaptado de Livingston <i>et al.</i> (2005)	21
Fig.2.6 – Modelo do HEC-HMS e seus elementos	23
Fig.3.1 – Recolha das amostras do solo em campo	28
Fig.3.2 – Amostras do solo utilizadas para a determinação do teor em água e da matéria orgânica.	30
Fig.3.3 – a) Fração de solo retida e passada, respetivamente, no peneiro de 2.0mm; b) Suspensão relativa ao material que passou no peneiro de 2.0mm	33
Fig.3.4 – Fração de solo retida e passada no peneiro de 2.0mm	34
Fig.3.5 – Amostradores cilíndricos utilizados na recolha das amostras	35
Fig.3.6 – Recolha de amostras na Serra	35
Fig.3.7 – Pesagem das amostras recolhidas; b) Colocação das amostras em recipientes com água	36
Fig.3.8 – a) Arrefecimento dos Picnómetros no exsiccador; b) Aquecimento do provete para extração do ar	40
Fig.3.9 – Aquecimento dos dois provetes para extração do ar	41
Fig.3.10 – Materiais utilizados: a) Frasco com o antifloculante; b) Densímetro; c) Agitador elétrico ..	43
Fig.3.11 – a) Aquecimento da mistura com o antifloculante; b) Provete com a suspensão passada no peneiro de 0.075 mm	44
Fig.3.12 – Aquecimento da mistura com a água oxigenada; b) secagem do material que ficou retido no peneiro de 0.075 mm	45

Fig.3.13 – Curva granulométrica dos solos do Litoral Algarvio e da Serra Algarvia	48
Fig.3.14 – Classificação textural dos solos do Litoral e da Serra Algarvia, segundo S.R.O.A	48
Fig.3.15 – Classificação textural dos solos do Litoral e da Serra Algarvia, segundo Trilinear	49
Fig.3.16 – Classificação textural dos solos do Litoral e da Serra Algarvia, segundo F.A.O.....	50
Fig.3.17 – Simulação do incêndio nas amostras B, C e D.....	52
Fig.3.18 – Temperaturas alcançadas no a) ensaio B e b) no ensaio D	52
Fig.4.1 – Corte e confinamento lateral da amostra.....	56
Fig.4.2 – a) Corte e cravação das estacas; b) Colocação da base da caixa	57
Fig.4.3 – Ensaio com recurso a infiltrómetro de duplo anel: a) Amostra A, b) amostra B, c) amostra C e d) amostra D	58
Fig.4.4 – Esquema hidráulica dos ensaios realizados com recurso a infiltrómetro de duplo anel, adaptado de Lança, <i>et al</i> (2014).	59
Fig.4.5 – Ensaio com recurso a infiltrómetro de duplo anel em Solos da Serra Algarvia: a) Amostra A, b) amostra B, c) amostra C e d) amostra D, Lança <i>et al.</i> (2014)	60
Fig.4.6 – Infiltração acumulada, I , em função da raiz quadrada do tempo, $t^{0.5}$, para os ensaios do litoral algarvio.....	61
Fig.4.7 – Valores de K_{KS} e K_S em função da respetiva massa e respetivas equações, para os ensaios do litoral algarvio	64
Fig.4.8 – Infiltração acumulada, I , em função do tempo, t , para os ensaios do litoral algarvio.....	65
Fig.4.9 – Infiltração acumulada, I , em função da raiz quadrada do tempo, $t^{0.5}$, para os ensaios da serra algarvia	66
Fig.4.10 – Valores de K_{KS} e K_S em função da respetiva massa e respetivas equações, para os ensaios da serra algarvia.....	68
Fig.4.11 – Infiltração acumulada, I , em função do tempo, t , para os ensaios da serra algarvia	69
Fig.5.1 – Ilustração das variáveis da equação 5.6.....	73
Fig.5.2 – Comparação da taxa de infiltração, pelo método SCS e pela abordagem de infiltração, segundo Hubert <i>et al.</i> (1981).....	75
Fig.5.3 – Gráfico da condutividade hidráulica versus CN , adaptado de Hubert <i>et al.</i> (1981)	79
Fig.5.4 – Gráfico da sorvidade versus CN , adaptado de Hubert <i>et al.</i> (1981)	80

Fig.5.5 – Variação de k_s em função de m , para diferentes classes texturais de solo	84
Fig.5.6 – Valores de K_{CN} em função de m para diferentes classes texturais de solo.....	85
Fig.5.7 – Valores de $K_{CN}^{\text{pós-incêndio}}/K_{CN}^{\text{pré-incêndio}}$ em função da severidade do incêndio e de $K_{CN}^{\text{pré-incêndio}}$, adaptado de Livingston <i>et al.</i> (2005)	86
Fig.6.1 – Localização da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel em Portugal Continental, adaptado de Lança, <i>et al.</i> (2014)	87
Fig.6.2 – Bacia Hidrográfica da Ribeira do Alportel e suas 5 sub-bacias.....	88
Fig.6.3 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Gilão e a respetiva área ardida no incêndio de Catraia-Tavira em 2012.....	89
Fig.6.4 – Classes taxonómicas do solo da bacia hidrográfica do Rio Gilão	90
Fig.6.5 – Ábaco triangular para a classificação textural dos solos do SROA de acordo com valores médios de Kopp <i>et al.</i> (1989)	91
Fig.6.6 – Classes de uso do solo na bacia hidrográfica do Séqua, segundo a carta COS'90.....	94
Fig.6.7 – Valores de CMI da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel	97
Fig.6.8 – Mapa do índice <i>difference Normalized Burn Ratio</i> (dNBR) obtido em 2012 na área afetada pelo Incêndio de Catraia.....	99
Fig.6.9 – Mapa do índice <i>difference Normalized Burn Ratio</i> (dNBR) obtido em 2013 na área afetada pelo Incêndio de Catraia.....	99
Fig.6.10 – Mapa do índice <i>difference Normalized Burn Ratio</i> (dNBR) obtido em 2014 na área afetada pelo Incêndio de Catraia.....	100
Fig.6.11 – Índice NDVI, da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel.....	101
Fig.6.12 – Curva de relacionamento entre o NDVI e a Biomassa total	103
Fig.6.13 – Biomassa, referente à bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel.....	104
Fig.6.14 – Rede hidrográfica da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel	105
Fig.6.15 – Perfil longitudinal das 5 sub-bacias	106
Fig.6.16 – Modelo Hidrológico da bacia hidrográfica do Séqua no HEC-HMS	107
Fig.6.17 – Hietograma para: a) $Tr=10$ anos; b) $Tr=100$ anos.....	110
Fig.6.18 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pré-incêndio, em agosto de 2012, para $Tr=10$ anos.....	111

Fig.6.19 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pré-incêndio, em agosto de 2012, para $T_r=100$ anos	111
Fig.6.20 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2012, para $T_r=10$ anos	112
Fig.6.21 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2012, para $T_r=100$ anos	113
Fig.6.22 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2013, para $T_r=10$ anos	114
Fig.6.23 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2013, para $T_r=100$ anos	114
Fig.6.24 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2014, para $T_r=10$ anos	115
Fig.6.25 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2014, para $T_r=100$ anos	115
Fig.7.1 – Corte longitudinal da estrutura a analisar.....	118
Fig.7.2 – Secção transversal: a) Sapata, pilar e tabuleiro da estrutura; b) Fundação e pilar da estrutura	118
Fig.7.3 – Espectro de Resposta obtido para o sismo Tipo 1	123
Fig.7.4 – Espectro de Resposta obtido para o sismo Tipo 2	123
Fig.7.5 – Escoamento de torno de um pilar cilíndrico, adaptado de Arneson <i>et al.</i> (2012)	125
Fig.7.6 – Ponte com pilares complexos, Eterna <i>et al.</i> (2011)	126
Fig.7.7 – Componentes de um pilar complexo, adaptado de Arneson <i>et al.</i> (2012)	129
Fig.7.8 – Ábaco para a determinação de K_{npier} , adaptado de Arneson <i>et al.</i> (2012)	130
Fig.7.9 – Representação da cavidade de erosão, devido ao efeito da coluna do pilar P_1	131
Fig.7.10 – Gráfico que define a velocidade e a profundidade em sapatas expostas, adaptado de Arneson <i>et al.</i> (2012)	132
Fig.7.11 – Representação da cavidade de erosão, devido ao efeito isolado da coluna do pilar P_1 e devido ao efeito combinado da coluna e da sapata do pilar P_1	133
Fig.7.12 – Distribuição dos vários tipos de molas tendo em conta a localização das mesmas, na sapata.....	135

Fig.7.13 – Modo de vibração antes do descalçamento da sapata	140
Fig.7.14 – Modo de vibração após o descalçamento da sapata	141
Fig.7.15 – Modo de vibração antes do descalçamento da sapata	143
Fig.7.16 – Modo de vibração após o descalçamento da sapata.....	143

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Parâmetros de infiltração de Green-Ampt para as várias classes de solo, adaptado de Chow <i>et al.</i> (1988)	16
Quadro 3.1 – Teor em água médio do solo antes da simulação de incêndio e após da simulação do incêndio	30
Quadro 3.2 – Percentagem de matéria orgânica para as doze amostras de solo, a 240°C.....	31
Quadro 3.3 – Teor em água, para 100°C, após a realização do incêndio	31
Quadro 3.4 – Percentagem de matéria orgânica para as doze amostras de solo, a 240°C.....	31
Quadro 3.5 – Valores de d , h , sat , G , e , n , e de γ , para os quatro provetes	38
Quadro 3.6 – Valores de d , h , sat , G , e , n , e de γ , para os quatro provetes	39
Quadro 3.7 – Densidade das partículas sólidas para os dois picnómetros	41
Quadro 3.8 – Densidade das partículas sólidas para os dois picnómetros	42
Quadro 3.9 – Resultados do ensaio da sedimentação – Litoral Algarvio	46
Quadro 3.10 – Resultados do ensaio da sedimentação – Serra Algarvia	47
Quadro 3.11 – Valores da quantidade de material combustível, M , da condutividade hidráulica, k_s , e da sorvidade, S	54
Quadro 4.1 – Variáveis características dos ensaios de simulação de incêndio em laboratório sobre o solo do litoral Algarvio	58
Quadro 4.2 – Variáveis características dos ensaios da serra algarvia, Lança <i>et al.</i> (2014)	60
Quadro 4.3 – Valores da condutividade hidráulica, k_s , sorvidade, S , e respetivos fatores, K_{KS} e K_S , para os solos do Litoral Algarvio.....	62
Quadro 4.4 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete A, para os solos do litoral algarvio	63
Quadro 4.5 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete B, para os solos do litoral algarvio	63

Quadro 4.6 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete C, para os solos do litoral algarvio	63
Quadro 4.7 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete D, para os solos do litoral algarvio	64
Quadro 4.8 – Valores da condutividade hidráulica, k_s , sorvidade, S , e respetivos fatores, K_{k_s} e K_S , para a serra algarvia, Lança <i>et al.</i> (2014)	66
Quadro 4.9 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete A, para os solos da serra algarvia	67
Quadro 4.10 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete B, para os solos do litoral algarvio	67
Quadro 4.11 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete C, para os solos do litoral algarvio	67
Quadro 4.12 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete D, para os solos do litoral algarvio	68
Quadro 5.1 – Parâmetros hidráulicos das classes texturais do solo, segundo Brakensiek <i>et al.</i> (1979)77	
Quadro 5.2 – Valore de k_s e S obtidos para as diversas classes texturais do solo através de um programa de cálculo, Hubert <i>et al.</i> (1981)	78
Quadro 5.3 – Grupo hidrológico dos solos e respetiva caracterização	81
Quadro 5.4 – Classificação do CN (SCS), adaptado de Lencastre, 1992 e Chow, 1988.....	82
Quadro 5.5 – Valores de CN obtidos para os vários tipos de solos e para diferentes valores de m . 83	
Quadro 5.6 – Valores de k_s obtidos, para os vários tipos de solos e valores de m	84
Quadro 5.7 – Valores de $CN_{pré-incêndio}$ e $CN_{pós-incêndio}$, Higginson e Jarnecke (2007)	86
Quadro 6.1 – Parâmetros descritivos da geomorfologia das sub-bacias	89
Quadro 6.2 – Classes taxonómicas dos solos da bacia Hidrográfica do Rio Séqua, textura e classificação segundo o ábaco triangular	92
Quadro 6.3 – Áreas das classes taxonómicas do solo e respetiva percentagem face à área total da bacia hidrográfica do Rio Séqua.....	93
Quadro 6.4 – Usos do solo da bacia Hidrográfica da Ribeira do Alportel.....	95
Quadro 6.5 – Áreas das classes de uso do solo e respetivas percentagens	96

Quadro 6.6 – Caracterização da recuperação da área ardida no incêndio de Catraia, ocorrido de julho de 2012	98
Quadro 6.7 – Medições realizadas no campo para a biomassa e respetivas coordenadas.....	102
Quadro 6.8 – Valores obtidos para a biomassa do sobreiro e do arbusto e suas quantidades	103
Quadro 6.9 – Parâmetros descritivos da linha de água principal da bacia hidrográfica	105
Quadro 6.10 – Características dos troços de rio, da bacia hidrográfica do Alportel	107
Quadro 6.11 – Tempo de concentração para cada sub-bacia.....	108
Quadro 6.12 – <i>Lag Time</i> aplicado a cada sub-bacia.....	108
Quadro 6.13 – Curvas de possibilidade udométrica de acordo com o DR. n.º 23/95 de 23 de Agosto	109
Quadro 6.14 – Valores de <i>CN</i> aplicados ao cenário pré-incêndio	110
Quadro 6.15 – Valores de <i>CN</i> aplicados ao cenário pós-incêndio-2012.....	112
Quadro 6.16 – Valores de <i>CN</i> aplicados ao cenário pós-incêndio-2013.....	113
Quadro 6.17 – Valores de <i>CN</i> aplicados ao cenário pós-incêndio-2014.....	115
Quadro 7.1 – Sobrecargas aplicadas na estrutura, de acordo com a tabela 4.2 do EN 1991-2	119
Quadro 7.2 – Características referentes à estrutura, de acordo com a NP EN 1991-1-4	120
Quadro 7.3 – Parâmetros referentes à ação do vento no tabuleiro da ponte, de acordo com a NP EN 1991-1-4	121
Quadro 7.4 – Características referentes aos pilares da estrutura, de acordo com a NP EN 1991-1-4	122
Quadro 7.5 – Parâmetros referentes à ação do vento nos pilares da ponte, de acordo com a NP EN 1991-1-4	122
Quadro 7.6 – Parâmetros adotados referentes à ação sísmica, segundo a NP EN 1998-1	123
Quadro 7.7 – Combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias.....	124
Quadro 7.8 – Combinações de ações para situações de projeto sísmicas	124
Quadro 7.9 – Variáveis do escoamento e do leito, necessárias para o cálculo da profundidade de descalçamento, y_s	128
Quadro 7.10 – Valor da profundidade de descalçamento, y_s e seus parâmetros.....	128
Quadro 7.11 – Valor relativo ao cálculo da profundidade de descalçamento, y_{spier} e seus parâmetros	130

Quadro 7.12 – Valor relativo ao cálculo da profundidade de descalçamento, y_{spc} e seus parâmetros	132
Quadro 7.13 – Variáveis do escoamento e do leito, necessárias para o cálculo da profundidade de descalçamento, y_s	133
Quadro 7.14 – Valor relativo ao cálculo da profundidade de descalçamento devido ao efeito da coluna, y_{spier} e seus parâmetros, considerando um pilar complexo.....	134
Quadro 7.15 – Valores relativos ao cálculo da profundidade de descalçamento devido ao efeito da sapata, y_{spc} e seus parâmetros, considerando um pilar complexo.....	134
Quadro 7.16 – Valor da rigidez das molas, K , antes do descalçamento da fundação do pilar P_1 , a aplicar às duas sapatas.....	136
Quadro 7.17 – Valor da rigidez das molas, K , após o descalçamento da fundação do pilar P_1 , a aplicar à sapata P_1	137
Quadro 7.18 – Valores obtidos para os momentos no apoio e a meio vão, frequência e modos de vibração, tendo em conta as molas da sapata do pilar P_1	138
Quadro 7.19 – Valores relativos ao deslocamento vertical e à rotação na sapata do pilar P_1	139
Quadro 7.20 – % relativa ao valor dos momentos existentes na base do pilar P_1	140
Quadro 7.21 – Valores relativos ao deslocamento horizontal e à frequência na sapata do pilar P_1	141
Quadro 7.22 – % relativa ao valor dos momentos existentes na base do pilar P_1	142

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - área da secção transversal do escoamento [m^2]

A - área da bacia hidrográfica [km^2]

A - área da amostra de solo [m^2]

A - soma das áreas projetadas dos elementos [m^2]

A - área da secção de influência, para o cálculo da profundidade de descalçamento [m^2]

A_{Ed} - valor de cálculo de uma ação sísmica [kNm^{-1}]

A_c - área limitada pelo contorno exterior [m^2]

A_{inf} - área de influência da sapata [m^2]

A_{ref} - área de referência para a ação do vento nos pilares da ponte [m^2]

$A_{ref,x}$ - área de referência para a ação do vento na direção x do tabuleiro da ponte [m^2]

a - distância ao eixo entre pilares [m]

a_{gR} - valor de referência da aceleração máxima [ms^{-2}]

a_g - valor de cálculo da aceleração [ms^{-2}]

a_{pc} - largura inicial da sapata [m]

a_{pier} - diâmetro do pilar [m]

- parâmetro da equação da onda cinemática [adimensional]

B - largura da seção transversal [m]

b - diâmetro dos pilares [m]

- parâmetro da equação da onda cinemática [adimensional]

C - coeficiente de força do vento aplicado ao tabuleiro da ponte [adimensional]

C_A - correção do antifloculante [adimensional]

C_M - correção do menisco [adimensional]

C_N - número de escoamento [adimensional]

C_t - correção da temperatura [adimensional]

C_{dir} - coeficiente de direção [adimensional]

C_e - coeficiente de exposição [adimensional]

C_f - coeficiente de força do vento aplicado aos pilares da ponte [adimensional]

$C_{f,x}$ - coeficiente de força para a ação do vento na direção x [adimensional]

$C_{f,0}$ - coeficiente de força para cilindros sem livre escoamento em torno das extremidades [adimensional]

$C_{f,x,0}$ - coeficiente de força para a situação sem livre escoamento em torno das extremidades [adimensional]

C_{season} - coeficiente de sazão [adimensional]

D - diâmetro das partículas [mm]

D_{max} - diâmetro do tronco [cm]

D_{50} - tamanho do material granular do leito [m]

d - densidade das partículas solidas [adimensional]

d - diâmetro do tronco [cm]

d - altura do tabuleiro [m]

d - profundidade do fluxo [m]

d_1 - altura do guarda-corpos [m]

d_{tot} - altura a considerar para a área de referência $A_{ref,x}$ [m]

- porosidade efetiva [adimensional]

H - deslocamento horizontal relativo à sapata do pilar P_1 [mm]

v - deslocamento vertical relativo à sapata do pilar P_1 [mm]

E_d - valor de cálculo do efeito das ações [kNm⁻¹]

e - índice de vazios médio do solo [adimensional]

e_d - índice de vazios do solo seco [adimensional]

e_{sat} - índice de vazios do solo saturado [adimensional]

$F(t)$ - função infiltração acumulada [mm]

F_a - precipitação retida no solo depois do escoamento se iniciar [mm]

F_w - força do vento a aplicar à estrutura [kNm⁻²]

F_{r1} - número de *Froude* do escoamento de aproximação ao pilar [adimensional]

f - distância entre a borda frontal da sapata e o pilar [m]

$f(t)$ - taxa de infiltração potencial [mmh⁻¹]

f_0 - taxa de infiltração inicial [mmh⁻¹]

f_c - taxa de infiltração constante [mmh⁻¹]

- índice de cheios [adimensional]

- função da profundidade de erosão [adimensional]

G - densidade das partículas sólidas do solo [adimensional]

G - ação permanente [kNm⁻²]

g - aceleração da gravidade [ms⁻²]

- peso volúmico [kNm⁻³]

d - peso volúmico seco [kNm⁻³]

G - coeficiente parcial relativo às ações permanentes [adimensional]

h - peso volúmico húmido [kNm⁻³]

Q - coeficiente parcial relativo às ações variáveis [adimensional]

sat - peso volúmico saturado [kNm⁻³]

w - peso volúmico da água [kNm⁻³]

H - altura de copa [cm]

h_1 - altura da coluna do pilar acima do leito, antes do descalçamento [m]

I - infiltração acumulada [mm]

I - declive médio [mm^{-1}]

I_a - precipitação retida no solo antes do escoamento se iniciar [mm]

$I(t)$ - infiltração acumulada em função do tempo [mm]

K - quociente entre a densidade da água à temperatura T_x e a 20°C [adimensional]

K - rigidez das molas da fundação [kNm^{-1}]

K_{CN} - fator de correção da curva número [adimensional]

K_g - fator de forma da secção transversal do canal [adimensional]

K_{hpier} - coeficiente que contabiliza a altura da coluna do pilar acima do leito e o efeito de proteção da sapata a uma distância f , do pilar. [adimensional]

K_{KS} - fator de correção da condutividade hidráulica [adimensional]

K_S - inverso da rugosidade de Mannig-Strickler [$\text{m}^{1/3}\text{S}^{-1}$]

K_s - condutividade hidráulica [mmh^{-1}]

K_s - fator de correção da sorvidade [adimensional]

K_s - fator de forma do pilar [adimensional]

K_s - módulo de reação do solo [kNm^{-3}]

K_α - fator de inclinação angular do pilar [adimensional]

K_w - fator de correção para pilares grandes em água pouco profundas [adimensional]

K - fator de correção da porosidade [adimensional]

K - fator de correção do potencial matricial do solo [adimensional]

K_1 - fator de correção para a forma da secção do pilar [adimensional]

K_2 - fator de correção para o ângulo de enviesamento do pilar face à direção do escoamento [adimensional]

K_3 - fator de correção para a condição do leito [adimensional]

k - coeficiente para cilindros verticais dispostos em linha [adimensional]

L - profundidade do solo [mm]

L - comprimento da linha de água principal [km]

L - comprimento da ponte [m]

L - comprimento do pilar [m]

L_c - leitura do densímetro corrigida [adimensional]

L_s - leitura direta feita na parte superior do menisco [adimensional]

I - altura do pilar [m]

- número de vazios do solo [adimensional]

- esbelteza [adimensional]

M - material combustível [kg]

M_2 - momento existente na base do pilar P_1 , na direção 2 [kNm⁻¹]

M_3 - momento existente na base do pilar P_1 , na direção 3 [kNm⁻¹]

$M_{3,apoio}$ - momento no apoio [kNm⁻¹]

$M_{3,meio\ v\tilde{a}o}$ - momento a meio vão [kNm⁻¹]

m - material combustível [kgm⁻²]

$m_{\text{ÁguaSolo}}$ - massa de água no solo [g]

m_b - massa do provete seco [g]

m_{SoloSat} - massa do solo saturado [g]

m_{SoloSeco} - massa do solo seco [g]

m_1 - massa da cápsula [g]

m_2 - massa da cápsula e da amostra de solo antes da secagem [g]

m_3 - massa da cápsula e da amostra de solo seca a uma temperatura de 60°C [g]

m_3 - soma da massa do picnómetro, com a água à temperatura T_x [g]

m_4 - massa da cápsula e da amostra de solo seca a uma temperatura de 103°C [g]

m_4 - massa do solo seco [g]

m_5 - massa da cápsula e da amostra de solo seca a uma temperatura de 240°C [g]

m_5 - soma da massa do picnómetro com a mistura à temperatura T_x [g]

m_b - massa do provete seco [g]

N_D - partículas com diâmetro inferior a D [%]

N'_{10} - material retido no peneiro de 2.0 mm [%]

n - porosidade do solo [%]

n - coeficiente de rugosidade de Mannig-Strickler [adimensional]

n_D - partículas de diâmetro inferior a D , referente à massa seca do solo usado na sedimentação [%]

μ - porosidade efetiva do solo [adimensional]

P - perímetro molhado da secção transversal [m]

P - perímetro da bacia hidrográfica [km]

P - precipitação total [mm]

P - precipitação incremental [mm/15min]

P - perímetro da secção de influência para o cálculo da profundidade de descalçamento [m]

P_e - precipitação efetiva [mm]

- potencial matricial do solo [mm]

a - pressão de capilaridade [mm]

b - pressão do ar [mm]

- coeficiente de efeitos de extremidade [adimensional]

α_2 - coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável [adimensional]

Q - caudal da secção [m^3s^{-1}]

Q - ação variável [kNm^{-2}]

q - coeficiente de comportamento [adimensional]

Re - número de Reynolds [adimensional]

r - taxa de precipitação [adimensional]

r - raio hidráulico [m]

r^* - taxa de precipitação normalizada [adimensional]

r_p - intensidade de precipitação que origina a saturação do solo [adimensional]

ρ_s - massa volúmica do ar [kgm^{-3}]

ρ - densidade da massa [kgm^{-3}]

S - sorvidade [$\text{mmh}^{-0.5}$]

S - retenção máxima por infiltração [adimensional]

S - coeficiente de solo [adimensional]

S_e - saturação efetiva [adimensional]

S_f - declive da linha de energia [mm^{-1}]

S_f - fator de sucção do armazenamento [adimensional]

S_r - grau de saturação do solo [adimensional]

S_0 - declive do perfil longitudinal da linha de água [mm^{-1}]

S_0 - declive do perfil longitudinal do leito [mm^{-1}]

S_3 - declividade equivalente constante [kmkm^{-1}]

σ_D - coeficiente de graduação [adimensional]

T_B - limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante [s]

T_C - limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante [s]

T_c - tempo de concentração [h]

T_D - valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante [s]

Tr_{10} - tempo de concentração para 10 anos [anos]

Tr_{100} - tempo de concentração para 100 anos [anos]

t - tempo [s]

t - intervalo de tempo desde o início da sedimentação até à leitura do densímetro [min]

t - tempo [h]

t - tempo de duração da precipitação [h]

t_p - tempo necessário para que a saturação ocorra [h]

$t^{0.5}$ - raiz quadrada do tempo [h]

- porosidade volumétrica do solo [adimensional]

- teor em água [%]

- rotação relativa à sapata do pilar P_1 [adimensional]

$i_{residual}$ - porosidade residual do solo [adimensional]

i - teor de humidade volumétrico inicial [adimensional]

r - teor de humidade residual [adimensional]

U - velocidade do escoamento de aproximação [ms^{-1}]

U_c - velocidade crítica do escoamento [ms^{-1}]

U_X - modo de vibração da estrutura na direção X [adimensional]

U_Y - modo de vibração da estrutura na direção Y [adimensional]

U_Z - modo de vibração da estrutura na direção Z [adimensional]

$V_{Água}$ - volume de água no solo [m^3]

V_v - soma do volume de água com o volume de ar no solo [m^3]

V_{solo} - volume do solo [m^3]

V_w - volume de água [m^3]

V_2 - velocidade média ajustada, do escoamento na vertical, próximo da ponte [ms^{-1}]

$V_{2,apoio}$ - esforço transversal no apoio [kN]

$V_{2,meio\ v\tilde{a}o}$ - esforço transversal a meio vão [kN]

v - índice de precipitação [adimensional]

v_f - velocidade média na zona do fluxo abaixo da parte superior da sapata [ms^{-1}]

ν - viscosidade cinemática do ar [m^2s^{-1}]

b - valor de referência da velocidade do vento [adimensional]

$v_{b,0}$ - valor básico da velocidade de referência do vento [adimensional]

$v(z_e)$ - velocidade de pico do vento, à altura z_e [adimensional]

W - profundidade acumulada de infiltração [adimensional]

W_p - quantidade de água infiltrada até à saturação do solo [adimensional]

W_s - peso do solo seco [kg]

W_w - peso da água [kg]

X - distância medida segundo a direção do escoamento [m]

Y - profundidade do escoamento [m]

y_f - distância do leito ao topo da sapata [m]

y_s - profundidade de descalçamento [m]

y_s - profundidade total de erosão [m]

y_{spc} - componente da erosão referente à sapata do pilar [m]

y_{spg} - componente da erosão das estacas [m]

y_{spier} - componente da erosão referente à coluna [m]

y_1 - profundidade do escoamento de aproximação diretamente a montante do pilar [m]

y_2 - profundidade do escoamento ajustada a montante da ponte [m]

Z - profundidade de infiltração de água no solo [mm]

z_{min} - altura mínima [m]

z_e - altura total, desde a base do pilar até ao centro do tabuleiro da ponte [m]

z_s - profundidade efetiva [cm]

z_0 - comprimento de rugosidade [m]

AMC – Condição antecedente de humidade do solo, “*Antecedent Moisture Condition AMC*”

COS – Carta de uso e ocupação do solo

DCM – Classe de ductilidade média

F.A.O – Food and Agriculture Organization das Nações Unidas

HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

RET – Retenção

NDBR - *Diference Normalized Burn Ratio*

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*

MJudeu – Malhada do Judeu MOS – Matéria orgânica do solo

SCS – Soil Conservation Service

SROA – Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário

SIG – Sistemas de informação geográfica

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Nas últimas décadas, a frequência e a intensidade dos incêndios florestais têm aumentado, principalmente nos países do Sul da Europa, com grandes perdas humanas, ambientais e económicas.

Os incêndios florestais provocam alterações nos solos devido à exposição a temperaturas muito elevadas, depósito de cinzas e outros compostos voláteis. O solo pós-incêndio apresenta um aumento da repelência à água e uma diminuição da capacidade de infiltração. Tal facto pode potenciar o escoamento superficial, a ocorrência de inundações e o transporte de sedimentos à escala da bacia hidrográfica, podendo afetar obstáculos verticais, nomeadamente, pilares de pontes.

As cheias são fenómenos naturais que ocorrem devido a precipitações intensas. A ocorrência de incêndios florestais, bem como o uso e ocupação do solo, influenciam a relação entre precipitação e escoamento superficial e conseqüentemente o regime de cheias num curso de água.

É conhecido que, após um incêndio florestal, a taxa de infiltração potencial dos solos tende a diminuir, contudo poucos estudos apontam para a quantificação dessa mesma diminuição. Neste sentido, torna-se relevante estudar, com vista a quantificar as modificações, que os incêndios florestais induzem na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica em cenários de precipitações intensas.

No presente trabalho, caracterizou-se experimentalmente a variação induzida por um incêndio na condutividade hidráulica, k_s , sorvidade, S , e potencial, ψ , de solos do Litoral e da Serra Algarvia. Os resultados permitem correlacionar a intensidade do incêndio com a variação nas propriedades hidráulicas em solos ardidos, o que se torna relevante para a aferição de modelos hidrológicos em cenário pós-incêndio. Isto possibilitou a aplicação do *software* Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC HMS) na modelação da resposta hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Séqua, a precipitações intensas em cenários pré-incêndio e pós-incêndio.

Posteriormente foi aplicado o código *Evaluating Scour at Brodges – Hydrulic Engineering Circular no.18* (HEC-18) para a avaliação da profundidade da cavidade de erosão no pilar P_1 , do modelo estrutural da ponte, em estudo.

No modelo estrutural, simulado através do *software* SAP 2000 V.17, realizou-se uma análise aos modos de vibração da estrutura, comparando-se as diferenças existentes na estrutura, antes e depois do descalçamento da fundação do pilar P_1 , efetuando-se, posteriormente, uma análise estrutural aos esforços existentes, após a cavidade de erosão junto ao pilar P_1 atingir a profundidade máxima.

O objetivo desta dissertação é contribuir para a compreensão e caracterização do efeito dos incêndios na modificação das propriedades hidráulicas dos solos, inferir o efeito dessas alterações na alteração da resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica a precipitações intensas e determinar qual o impacto de todo este processo no desenvolvimento da cavidade de erosão junto a pilares de pontes e no comportamento estrutural das pontes.

1.2. ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho é composto por 9 capítulos e por 16 Anexos que desenvolvem as várias etapas do estudo. No presente capítulo, 1, é feita um enquadramento do estudo e uma apresentação sumária do trabalho que se irá apresentar ao longo da dissertação.

No capítulo 2 é feita uma síntese de conhecimentos, onde se apresentam os conceitos fundamentais inerentes ao estudo.

No capítulo 3 são apresentados os ensaios realizados nos laboratórios de geotecnia e de hidráulica da Universidade do Algarve, às amostras de solo recolhidas no Litoral e na Serra Algarvia.

No capítulo 4 é feita a caracterização da variação induzida por um incêndio, na condutividade hidráulica, k_s , sorvidade, S , e potencial, ψ , nos solos do Litoral e da Serra Algarvia, através da correlação das curvas de infiltração, obtidas através dos ensaios e observadas com os modelos de Philips e Green-Ampt. Os resultados obtidos neste capítulo foram apresentados, oralmente, no I Seminário da rede de Incêndios – Solo, I Simpósio Ibero-Afro-Americano de Risco e serão publicados na edição nº23, da revista Territorium, num artigo intitulado: *Efeito dos incêndios nas propriedades hidráulicas dos solos do Ludo, Algarve*.

No capítulo 5 apresenta-se a avaliação do efeito dos incêndios nos solos do Litoral e da Serra do Algarve, através de uma avaliação baseada no método da curva número. Os resultados obtidos neste capítulo foram apresentados, oralmente, no I Seminário da rede de Incêndios – Solo, I Simpósio Ibero-Afro-Americano de Risco e serão publicados na edição nº23, da revista Territorium, num artigo intitulado: *Efeito do incêndio de Catraia no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Séqua*.

No capítulo 6, é aplicado o modelo Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) para simular a resposta hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Séqua em cenário pré-incêndio e pós-incêndio. Para tal, caracterizaram-se os solos e os usos dos solos, identificaram-se as áreas queimadas pelo incêndio de Catraia, em 2012. Determinou-se a severidade do incêndio, bem como a biomassa acima do solo, obtendo-se então os caudais de ponta de cheia, para os cenários pré-incêndio, e pós incêndio em 2012, 2013 e 2014. Os resultados obtidos neste capítulo foram também apresentados, oralmente, no I Seminário da rede de Incêndios – Solo, I Simpósio Ibero-Afro-Americano de Risco e serão publicados na edição nº23, da revista Territorium, num artigo intitulado: *Efeito do incêndio de Catraia no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Séqua*.

No capítulo 7 é apresentado um modelo de uma ponte, para o qual se determina a profundidade máxima da cavidade de erosão de um pilar da respetiva estrutura, P_1 , através

da aplicação da metodologia preconizada no documento, *Evaluating Scout at bridges – Hydrologic Engineering Circular no.18* (HEC-18) e se simula a estrutura em análise, através de um programa de análise estrutural de elementos finitos, SAP 200 V.17, determinando-se, posteriormente, qual o comportamento da estrutura, antes e depois do desenvolvimento da cavidade de erosão junto ao pilar.

No capítulo 8 são indicadas as conclusões finais acerca deste trabalho, realçando-se os aspetos mais importantes e relevantes deste estudo e apontando-se possíveis desenvolvimentos que poderão ter continuidade no futuro, a fim de aprofundar este tema.

No capítulo 9 são apresentadas as referências bibliográficas que estabeleceram os princípios e os fundamentos e forneceram um suporte sólido a este estudo.

Os anexos apresentados correspondem a um complemento ao capítulo 3, do presente trabalho, onde se encontra informação adicional, referente aos ensaios laboratoriais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

O Sul da Europa é uma região em que os incêndios florestais são parte integrante dos ecossistemas, contudo nas últimas décadas verifica-se que a frequência e a intensidade dos mesmos tem aumentado. Portugal, Espanha, Itália, França e Grécia, são os países da União Europeia com maior índice de risco de deflagração e onde ocorrem as maiores perdas humanas, ambientais e económicas devido aos incêndios florestais.

Um pouco por toda a bacia Mediterrânica, as cargas de combustível nas florestas têm aumentado nas últimas décadas, devido à desertificação demográfica do interior e aos programas de florestação. De acordo com os cenários de alterações climáticas dados pelo IPCC, é de esperar períodos de seca mais prolongados, temperaturas mais altas e ventos mais fortes. Neste cenário é muito provável que o número e intensidade dos incêndios florestais continue a aumentar no futuro próximo.

Um incêndio florestal provoca a destruição do coberto vegetal e a modificação das propriedades hidráulicas dos solos e consequentemente a vulnerabilidade das zonas a jusante, sujeitas a inundações, aumenta, Pierce *et al.* 2004. Contudo os efeitos exatos de um incêndio no solo não estão completamente compreendidos e no estado atual do conhecimento a sua quantificação é difícil.

A grande problemática dos incêndios florestais deriva dos efeitos adversos causados no ambiente, nomeadamente no solo, na água, no ar, na biodiversidade e na paisagem. A intensificação dos incêndios florestais origina situações muito nefastas, sendo elas, a diminuição da capacidade de regeneração dos ecossistemas, a perda da biodiversidade, a escassez da quantidade e diminuição da qualidade da água, a erosão do solo e a alteração do clima, Laranjeira e Leitão (2008).

O despoletar de um incêndio depende de muitos fatores, entre eles podem destacar-se, a localização geográfica do mesmo, as características climáticas, a variabilidade interanual da precipitação, os impróprios padrões de uso do solo e o clima e a meteorologia. As alterações climáticas que se fazem sentir atualmente e que tendem a intensificar-se, nomeadamente o aumento da duração e da intensidade dos períodos de seca e de cheias e a tendência geral para os fenómenos climáticos se tornarem mais extremos, irão certamente contribuir para que o número e magnitude dos incêndios florestais tendam a aumentar, Castro *et al.* (2010).

A perda de vegetação, devida aos incêndios florestais, conduz à perda da proteção do solo e à acumulação na superfície de cinzas e resíduos queimados. Após um incêndio florestal a capacidade de recuperação dos solos florestais depende muito das condições climáticas após o incêndio, do tipo de solo, do declive e da vegetação, Castro *et al.* (2010).

Neste sentido, é grande a importância de estudar, com vista a quantificar as modificações que os incêndios florestais induzem nas propriedades hidráulicas dos solos.

2.2. PROPRIEDADES DOS SOLOS

Os solos são corpos naturais que têm propriedades resultantes das formações geológicas de base e da atuação conjunta do clima e dos organismos, durante um determinado período de tempo. A maior ou menor capacidade de retenção de água no solo está relacionada com a sua estrutura, porosidade, textura e matéria orgânica.

Entre as inúmeras razões para a modificação das propriedades dos solos, podemos destacar, o efeito dos incêndios florestais, Serra *et al* (2002).

2.2.1. Estrutura

Através da estrutura dos solos é possível inferir algumas das propriedades deste, nomeadamente da resistência à compactação, porosidade, erodibilidade, capacidade de infiltração potencial e permeabilidade.

2.2.2. Porosidade

A porosidade do solo define-se como o volume de solo preenchido pela água e pelo ar, Reichert *et al.* (2009), sendo que, qualquer redução desta, afeta o efeito de “esponja” do solo, ou seja, a capacidade deste absorver e reter humidade. Esta redução pode existir e manifesta-se como consequência de um incêndio, devido à redução do coberto vegetal, Castro *et al.* (2010). O impacto que a precipitação tem no solo, também é responsável pela diminuição da porosidade, uma vez que dá origem a uma diminuição da capacidade de retenção da água no solo e, conseqüentemente, a um aumento do escoamento superficial, contribuindo, este último, para a erosão da superfície do solo, Castro *et al.* (2010).

2.2.3. Textura

A textura é também uma das características importantes do solo, sendo esta uma das propriedades mais estáveis do mesmo, porém muito relacionada e afetada pelo grau de intemperismo, Reichert *et al* (2009).

2.2.4. Matéria Orgânica

A quantidade de matéria orgânica pode diferir consoante o clima e o ambiente onde o solo se encontrar, sendo mais elevada em zonas húmidas e mais baixa em zonas desérticas.

A existência de matéria orgânica no solo favorece o desenvolvimento de micro-organismos no mesmo, que juntamente com esta, impedem a desagregação das partículas do solo.

2.2.5. Densidade das partículas

A densidade das partículas de um solo pode ser definida como a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas, não considerando a porosidade.

Quanto maior for a matéria orgânica de um solo, menor será a sua densidade de partículas. A densidade de partículas de um solo está diretamente relacionada com a capacidade de infiltração de água do mesmo.

2.2.6. Humidade

A humidade é também uma importante propriedade dos solos, uma vez que, quanto mais húmido o solo estiver, mais reduzido se torna o espaço poroso, levando, conseqüentemente, a uma diminuição da capacidade de infiltração do mesmo.

2.3. O EFEITO DO CALOR E DA CINZA NA MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS

Segundo Stoof (2011), os incêndios florestais podem aumentar a vulnerabilidade dos eventos de cheias e da erosão de uma paisagem.

Os incêndios florestais, ao removerem a cobertura vegetal do solo, alteram as suas propriedades e induzem repelência à água no solo, aumentando assim o escoamento superficial o que, por sua vez, pode dar origem a inundações. Apesar do relacionamento existente entre o efeito dos incêndios nos processos de cheia e da capacidade de retenção de água na regeneração da vegetação pós-fogo, a compreensão do efeito direto que os incêndios têm nas características de retenção de água do solo, é limitada, Stoof (2011).

Stoof (2014) afirma que a capacidade de armazenamento de água de um solo é um aspeto importante, e que em conjunto com a infiltração, determinam a relação entre a precipitação e o escoamento superficial. São então a textura, o conteúdo de matéria orgânica, a estrutura e a densidade de matéria das partículas de um solo, que determinam a capacidade de retenção de água de um solo.

Segundo Stoof (2011) é muito difícil compreender os efeitos que os incêndios têm nas propriedades dos solos, uma vez que a variabilidade espacial das propriedades do solo e a dinâmica dos incêndios, no campo, são muito elevadas. Tendo em conta que as maiores mudanças e os maiores efeitos dos incêndios são esperados de grandes incêndios florestais, as amostras laboratoriais que sejam realizadas pré e pós incêndio no mesmo local, uma vez que só podem ser realizadas com incêndios experimentais prescritos e com temperaturas

muito menos elevadas, fazem com que haja uma grande diferença do campo, para o laboratório, dificultando assim o processo conclusivo.

A presença de cinzas pode desempenhar uma função importante no fluxo e nos processos de transporte que ocorrem, após o incêndio, tendo em conta os efeitos do aquecimento. No entanto, são escassos, os estudos realizados, sobre os efeitos físicos que as cinzas têm no solo, após as primeiras chuvadas, depois dos incêndios.

Stoof (2011), ao longo do seu trabalho, avaliou os efeitos do incêndio e das cinzas na retenção de água no solo, através da realização de experiências em condições controladas de laboratório. Porém, o seu estudo excluiu os efeitos da variabilidade espacial dos solos e a dinâmica da intensidade do incêndio, que são frequentemente encontrados em condições de campo, mas muito difíceis de simular em laboratório.

Segundo Stoof (2011), a queimada e o aquecimento, durante um incêndio, dão origem ao aumento da densidade aparente seca do solo, diminuindo o teor de matéria orgânica do mesmo, o que por sua vez, faz com que a textura do solo seja bastante alterada, aumentando o conteúdo de argila e silte e diminuindo o conteúdo de areia, de um solo. Estas alterações só ocorrem para solos aquecidos a temperaturas acima de 300 °C.

Stoof (2011) concluiu que a queimada faz com que a água disponível para as plantas aumente significativamente, diminuindo, no entanto, a totalidade da quantidade de água que pode ser armazenada no solo e a porosidade do mesmo. Esta constatação deve-se ao facto dos ensaios terem sido realizados em laboratório, onde o efeito da capacidade de campo está ausente.

A mesma autora afirma também que existem diferenças elevadas, na resposta dos solos, para aquecimentos a baixas tensões e para aquecimentos a média ou a altas tensões. Para baixas tensões (de 0 a 3.1 kPa), a diminuição do teor de humidade aumenta, com o aumento da temperatura até 300 °C, diminuindo, no entanto, nos solos aquecidos a temperaturas mais elevadas.

Segundo Stoof (2011), o grau de combustão é também um parâmetro importante em relação às propriedades de retenção de água, de cinzas e de carvão. A autora afirma que existe um grande efeito do grau de combustão sobre as propriedades de retenção de água, das cinzas (< 2mm) e do carvão (entre 2 e 5mm), constatando que o carvão, parcialmente consumido, retém, significativamente, menos água, do que a cinza completamente consumida, contendo esta, apenas metade da quantidade de água disponível.

Stoof (2001) verificou, através da incorporação de cinzas no solo, que o peso específico seco do solo não aumentou, apesar da adição de cinzas. Segundo a autora, esta explicação pode estar no facto do volume de cinzas ter alterado as amostras, devido ao aumento do seu volume, enquanto o volume das amostras experimentais diminuiu, devido à sedimentação. Uma vez que as cinzas tinham um teor de matéria orgânica inferior ao solo, fizeram com que se acrescentasse relativamente mais matéria mineral no solo.

A autora concluiu que a incorporação das cinzas aumentou o teor de humidade do solo, para todas as tensões, aumentando a quantidade de água disponível para as plantas de forma significativa.

No que diz respeito à adição de cinzas por infiltração, Stoof (2011), ao longo do seu estudo, observou que esta adição causa um ligeiro aumento da densidade aparente e uma diminuição significativa na fração de peso de matéria orgânica. Para além disso, aumenta também o teor de silte e diminui o teor de areia.

A autora afirma a que magnitude do efeito da adição de cinzas por infiltração, no teor em água do solo é causado pela interação significativa entre a tensão e a infiltração de cinzas, uma vez que a adição de cinzas por infiltração aumenta ligeiramente o teor de humidade do solo para todas as tensões, sendo este aumento significativo ao nível da saturação e na capacidade de campo.

Durante os ensaios experimentais realizados por Stoof (2011), ela verificou que o teor de matéria orgânica, durante a queimada, com o aquecimento a 300° C e para temperaturas acima deste valor, também teve um efeito semelhante. Para temperaturas mais baixas, o aquecimento não teve efeito sobre o teor de matéria orgânica.

Stoof (2011) observou o mesmo limite, de 300° C, em relação à textura do solo. As suas experiências demonstraram que, para solos aquecidos a 300 °C e a temperaturas superiores, o teor de argila e de silte aumentou após a queimada e o aquecimento, diminuindo o teor de areia. A autora explica que esta mudança observada, na distribuição do tamanho das partículas, após o aquecimento e a queimada, pode possivelmente ser explicada devido à desagregação das partículas de areia, em partículas do tamanho de silte e argila.

Assim sendo confirma-se que os solos queimados retêm menos água do que solos não queimados, com tensões semelhantes, bem como, que o incêndio altera a forma da curva de retenção de água de um solo. Esta autora também conclui que existe um limite de 300 °C e acima do qual estas alterações ocorrem. As queimadas e o aquecimento afetam principalmente a gama húmida da curva de retenção de água, entre a saturação e a capacidade de campo.

A autora afirmou, no entanto, que a diminuição da retenção de água não é linear com a diminuição da matéria orgânica. Ela verificou que o teor de matéria orgânica diminui com o aumento da temperatura, e que a retenção de água no solo na gama húmida diminui também até aos 300 °C e aumentando parcialmente aos 400 e 500 °C. Segundo a autora, a explicação pode estar no grau de combustão, uma vez que é este que determina a composição das cinzas e da matéria orgânica.

Stoof (2011) concluiu que com o aumento da temperatura e com o aumento do grau de combustão, a quantidade de cinzas aumenta. Para temperaturas até 300 °C, a combustão incompleta da matéria orgânica do solo irá produzir material parecido ao carvão, que retém pouca água no solo. No entanto, para temperaturas mais elevadas, ocorre a combustão completa da matéria orgânica do solo e são produzidas cinzas, que retêm muito mais água no solo e, portanto, compensa parcialmente a diminuição da retenção de água, causada pela perda, induzida por aquecimento, da matéria orgânica.

A autora afirma que o efeito dos incêndios sobre a água disponível para as plantas depende do aumento da temperatura, sendo que, para baixas temperaturas a água disponível para as plantas não é afetada ou diminuída, enquanto para temperaturas mais elevadas, aumenta a

água disponível para as plantas. No entanto, segundo a mesma autora, deve ser tomado cuidado em tirar conclusões muito precipitadas sobre os efeitos benéficos dos incêndios na retenção de água, pois embora as experiências sugiram que os incêndios de alta intensidade podem ser benéficos, por aumentarem a água disponível para as plantas, o destino das áreas queimadas irá depender do impacto do incêndio em todo o sistema do solo.

Tal como foi mencionado anteriormente, o aquecimento não simula totalmente as condições durante um incêndio, porque não considera os efeitos diretos de chamas.

Stoof (2011) afirmou que os efeitos dos incêndios nos solos, em campo, não dependem só da temperatura do incêndio, mas também da duração do aquecimento, desempenhando, o contacto da chama e o tempo de duração do incêndio, um grande papel na determinação destes efeitos, sendo, no entanto, muito difícil de simular em laboratório. Ela relata também que a estrutura do solo e a distribuição do tamanho dos poros são também fatores a ter em conta, uma vez que são muito distintos em campo e em laboratório, devido aos solos serem remexidos e peneirados, em laboratório.

Após várias pesquisas, Stoof (2011) afirmou que os resultados obtidos nos seus trabalhos vinham contradizer alguns estudos mineralógicos, que mostravam os poros do solo a ser preenchidos por partículas de cinzas, diminuindo conseqüentemente a porosidade do solo. A sua explicação para este facto está nas características das cinzas em poderem aumentar e diminuir o seu volume, ou seja, para um solo que contém cinzas, o volume de água armazenada aquando da saturação, não é só composto pelo volume de água armazenada nos poros, mas também, pelo volume da água absorvida pelas partículas de cinza. Assim sendo, o teor em água, aquando da saturação, aumenta por causa da absorção de água pelas cinzas, apesar do facto de que a cinza pode preencher os poros do solo e, assim, diminuir a porosidade do solo.

Segundo Stoof (2011) a retenção de água no solo aumenta com o aumento da adição de cinzas sendo, no entanto, o efeito na distribuição do tamanho das partículas, uma grande diferença. A infiltração de cinzas faz diminuir a proporção de partículas siltosas de um solo e aumenta a proporção de partículas arenosas do mesmo.

Stoof (2011) afirma que, é apenas necessária uma pequena quantidade de cinzas para dar origem a um aumento considerável da retenção de água no solo, sendo que, no entanto, só as partículas mais finas das cinzas se infiltram com a água, ficando o material mais grosseiro na parte superior do solo. A explicação para a grande quantidade de cinzas não infiltradas é o aumento do volume das partículas de cinza, que fazem com que estas fiquem demasiado grandes para serem lavadas até ao interior dos poros do solo, o que faz com que apenas as partículas mais pequenas de cinzas de infiltrem, para as camadas mais profundas do solo.

Stoof (2011) afirma, concluindo, que o destino das cinzas, durante as primeiras chuvadas, dependerá das características da precipitação existentes, das características das cinzas, das características físicas e químicas do solo e da inclinação do solo, realçando, no entanto, esta é uma área que requer um estudo mais aprofundado, para que se possa compreender melhor os processos físicos e as conseqüências da infiltração de cinzas nos solos.

2.4. O CICLO HIDROLÓGICO

O sol é a grande fonte de energia, permitindo todo o movimento e funcionamento do ciclo hidrológico.

Segundo Lencastre e Franco (1984), tudo se inicia na atmosfera; embora não se possa considerar que o ciclo hidrológico tem princípio e fim, é na atmosfera que se acumula o vapor de água, que poderá dar origem à precipitação. Seguidamente, uma parte desta precipitação, durante a sua descida, é evaporada, voltando à atmosfera, outra parte é detida pelas folhas da vegetação sendo, posteriormente, evaporada retomando também à atmosfera e a outra parte atinge a superfície da terra, sendo esta última a parte mais significativa, da precipitação.

2.4.1. BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica define-se como uma área limitada topograficamente que é drenada por um curso de água ou por um sistema interligado de cursos de água, em que todos os caudais efluentes à bacia são extraídos através de uma única saída.

O comportamento hidrológico das bacias hidrográficas está dependente de alguns fatores e características, nomeadamente da geometria, do sistema de drenagem, da geologia, dos solos, da vegetação e do relevo das bacias, Lencastre e Franco (1984).

O tipo de solos e a composição geológica das bacias hidrográficas estão inteiramente relacionados com a distribuição e o movimento da água nas bacias, uma vez que a maior ou menor velocidade do escoamento superficial determina a dimensão dos pontos de cheia e dos fenómenos de erosão.

A vegetação é também uma característica importante das bacias hidrográficas, não só ao nível da redução das grandes cheias fluviais, como também ao nível da conservação do solo, uma vez que, ao anular o choque direto da precipitação com a superfície do solo, reduz a velocidade do escoamento superficial, aumentando a infiltração, reduzindo assim a ação erosiva durante as chuvadas intensas de grande duração, Lencastre e Franco (1984).

2.4.2. PROCESSOS DO CICLO HIDROLÓGICO

Embora o conceito do ciclo hidrológico seja simples, os fenómenos hidrológicos são extremamente complexos, e não são totalmente percebidos. No entanto, podem ser representados de uma maneira mais simples, através do conceito dos sistemas, sendo um sistema um conjunto de partes ligadas que formam um todo. O ciclo da água pode ser tratado como um sistema, cujos seus componentes são a precipitação, infiltração, evaporação ou evapotranspiração, escoamento e armazenamento.

A maioria dos sistemas hidrológicos são considerados aleatórios porque o seu principal fator de produção é a precipitação, sendo esta altamente variável e imprevisível no tempo e no espaço.

Tendo em conta o estado atual do conhecimento é possível considerar o escoamento superficial e a infiltração com base em modelos determinísticos, contudo a precipitação possui uma forte componente aleatória que a remete para o campo dos modelos estocásticos.

A relação precipitação/escoamento superficial é então uma temática em constante desenvolvimento, devido à sua complexidade. A água proveniente da precipitação, ao atingir a superfície da terra, pode seguir dois caminhos distintos; uma parte infiltra-se, constituindo as águas subterrâneas, outra parte escoar à superfície, dando origem ao escoamento superficial, que irá findar no mar, Almeida (2010).

Assim sendo, segundo Lencastre e Franco (1984), a parte da precipitação que não for evaporada, que não se infiltrar ou que não permanecer retida em depressões, tendo em conta as leis da gravidade, escoar até à linha de água mais próxima, originando o escoamento superficial. No entanto, se estivermos perante uma precipitação de grande intensidade e duração, as linhas de água poderão atingir o seu limite, ultrapassando o seu leito habitual, dando origem às cheias.

Um dos grandes fatores que influencia também a ocorrência de grandes escoamentos superficiais, é a urbanização de determinados locais, que antes se encontravam no seu estado natural, Lencastre e Franco (1984).

Outro fator importante a ter em conta é a infiltração, sendo esta uma das grandes e mais importantes perdas no processo de precipitação-escoamento. Segundo Lencastre e Franco (1984), a infiltração corresponde ao movimento vertical da água para o interior do solo, resultante do efeito da gravidade que é influenciado pelo diâmetro dos poros e do potencial capilar, sendo composto por três processos: a entrada na superfície do solo, o armazenamento neste e a drenagem e percolação através do mesmo.

A capacidade de infiltração de um solo, obviamente correspondente à quantidade de água absorvida pelo solo, resulta do máximo valor da intensidade da precipitação que o solo pode absorver, sem que se inicie o escoamento superficial. O valor da capacidade de infiltração está inversamente dependente da duração da chuvada, ou seja, quanto maior for a duração da chuva, menor será a capacidade de infiltração. Lencastre e Franco (1984).

Assim sendo, a infiltração é o processo de penetração da água, da superfície, para o solo. A taxa de infiltração pode ser influenciada por muitos fatores, nomeadamente pelas condições da superfície, pelo coberto vegetal e pelas propriedades do solo, tais como, a sua porosidade, a condutividade hidráulica e o teor de humidade do solo, sendo este último muito importante relativamente à capacidade de infiltração do mesmo, uma vez que quanto menor for o teor de humidade na camada superior do solo, maior será o efeito de capilaridade, facilitando assim a infiltração.

Chamam-se horizontes aos estratos de solos sobrepostos que possuem características físicas distintas. Os solos, mesmo encontrando-se dentro de um espaço pequeno, apresentam uma grande variabilidade espacial. É devida a esta grande variabilidade espacial e também devido à variação das propriedades do solo, que a infiltração é um processo muito complexo, sendo apenas possível descrevê-lo, aproximadamente, com recurso a equações matemáticas.

O teor de humidade e a sua distribuição no solo são também processos complexos. Existem quatro zonas distintas, relativamente ao teor de humidade: a zona saturada perto da superfície, a zona de transmissão de fluxo não saturada e de teor de humidade constante, a zona de humedecimento, na qual a humidade diminui com a profundidade do solo e uma frente de humedecimento onde a variação do teor de humidade com a profundidade é tao grande, parecendo até existir uma grande descontinuidade, entre o solo molhado acima e o solo seco abaixo.

A taxa de infiltração, f , representa a água que entra através da superfície do solo por unidade de tempo, sendo expressa em mm por hora. Se a água ficar retida na superfície, a infiltração que irá ocorrer será a taxa potencial de infiltração. Se a taxa de fornecimento de água à superfície, for menor que a taxa potencial de infiltração, então a taxa de infiltração atual também será menor que a taxa potencial de infiltração. Em relação à infiltração acumulada, F , esta traduz a profundidade acumulada da água que é infiltrada, durante um determinado período de tempo, sendo igual ao integral da taxa de infiltração ao longo desse período (Chow *et al.*, 1988):

$$F(t) = \int_0^t f(t) \quad (2.1)$$

Reciprocamente, a taxa de infiltração é a derivada do tempo em relação à infiltração acumulada:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.2)$$

2.5. MODELOS DE INFILTRAÇÃO

2.5.1. EQUAÇÃO DE HORTON

Uma dos primeiros modelos de infiltração foi apresentado por Horton (1933), onde este observou que a infiltração se inicia com uma taxa, f_0 , e, exponencialmente, decresce até atingir uma taxa constante de f_c :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2.3)$$

sendo K o decaimento constante, tendo como unidades $[T^{-1}]$.

Em 1970, Eagleson e Raudkivi mostraram que a equação de Horton pode derivar da equação de Richard's (2.4), por considerarem que K e D são constantes independentes do teor de humidade do solo.

Assim sendo e, nestas condições, a equação pode ser reduzida para:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

que é a forma normal da equação difusora e pode ser resolvida pela quantidade de teor em humidade em função do tempo e da profundidade. A equação de Horton resulta de resolver a taxa de humidade difusa, $D(\partial\theta/\partial z)$, na superfície do solo (Chow *et al.*, 1988).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} + k \right) \quad (2.5)$$

2.5.2. EQUAÇÃO DE PHILLIPS

Em 1957 Philip resolveu a equação de Richard's convertendo-a para condições menos restritivas, assumindo que os fatores K e D podem variar com o teor de humidade .

Assim sendo, Philip aplicou a modificação Boltzmann, $B(z) = zt^{-1/2}$, para converter a Equação 2.4 numa equação diferencial ordinária em ordem a B e resolveu esta equação de maneira a originar várias series cumulativas da infiltração $F(t)$, sendo a aproximação final:

$$F(t) = St^{1/2} + kt \quad (2.6)$$

onde S é um parâmetro denominado de sorvidade, sendo uma função potencial de sucção do solo, e K a condutividade hidráulica do solo.

Assim sendo, pela equação diferencial temos:

$$f(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + k \quad (2.7)$$

em que, à medida que t tende para ∞ , $f(t)$ tende para K . Os dois parâmetros da equação de Philip's representam os efeitos de sucção no solo, por capilaridade, S , e por gravidade, K . Para uma coluna horizontal de solo, uma vez que a sucção é a única força que retira a água do estrato, a equação de Philip's fica reduzida para (in Chow *et al.*, 1988):

$$F(t) = St^{1/2} \quad (2.8)$$

2.5.3. MÉTODO DE GREEN-AMPT

Em 1911, Green-Ampt propôs uma representação simplificada para a infiltração. Este considerou que a frente de humedecimento de um solo é uma fronteira que divide o solo com teor de humidade θ_1 , situado a cima, do solo saturado com teor de humidade θ_2 , situado abaixo, podendo penetrar até uma profundidade L , durante um determinado período de tempo t , desde o início da infiltração.

Na figura seguinte é possível observar as variáveis do modelo de infiltração de Green-Ampt, representando o eixo vertical a distância a partir da superfície do solo e o eixo horizontal o teor de humidade do solo.

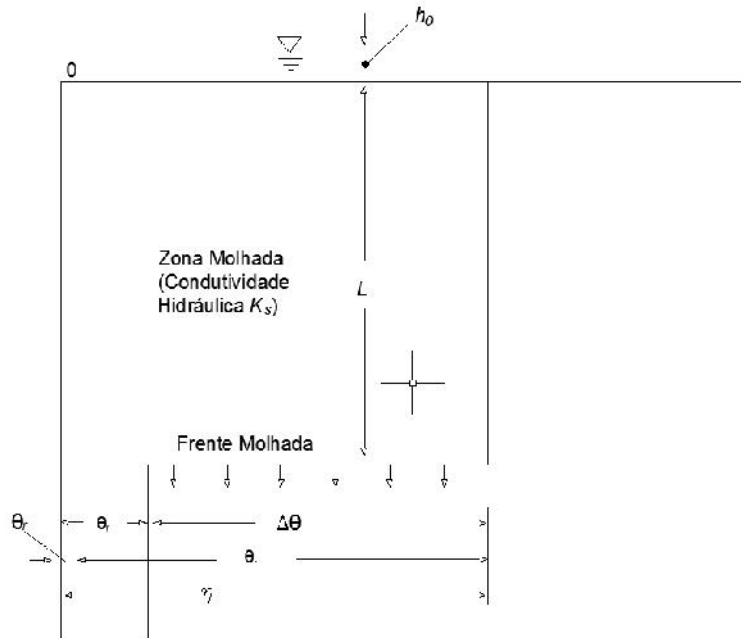


Fig.2.1 – Variáveis do modelo de infiltração de Green-Ampt, adaptado de Chow *et al.* (1988)

Assim sendo a expressão para a modelação da infiltração acumulada, segundo Green-Ampt, pode ser dada por:

$$F(t) = kt + \epsilon \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\epsilon \Delta \theta} \right) \quad (2.9)$$

sendo, $F(t)$ infiltração acumulada (mm), k condutividade hidráulica (mm/hora), t tempo (horas), ϵ potencial matricial (mm), $\Delta \theta$ variação do teor de humidade volumétrico do solo na passagem da frente de humedecimento (adimensional).

Segundo Green-Ampt a taxa de infiltração f , pode ser obtida por:

$$f(t) = k \left(\frac{\epsilon \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (2.10)$$

em que, f é a taxa de infiltração potencial.

A aplicação da equação de Green-Ampt revela, no entanto, alguns problemas para a modelação matemática da infiltração, uma vez que requer estimativas sobre determinados parâmetros, devido à sua grande variabilidade espacial, nomeadamente sobre a

condutividade hidráulica K , sobre a porosidade n , e sobre a fronteira de sucção da frente de humedecimento do solo h_f .

Em 1983, Brakensiek, Engleman e Rawls apresentaram um método para determinarem os valores médios dos parâmetros da equação de Green-Ampt. Analisaram, aproximadamente, 5000 amostras de solo nos Estados Unidos e determinaram valores médios dos parâmetros n , e , h_f e k , para diferentes classes de solo. Concluíram que, à medida que o solo se torna mais fino, ou seja, caminhando de areia para argila, a fronteira de sucção da frente de humedecimento do solo aumenta, ao contrário da condutividade hidráulica que diminui. Concluíram também que, para a porosidade e porosidade efetiva, os valores obtidos não apresentam uma variação significativa, dentro da mesma classe de solo, verificando-se, no entanto, que para a altura de sucção e para a condutividade hidráulica, os valores variam, consideravelmente, mesmo em amostras da mesma classe de solo Chow *et al* (1988), (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Parâmetros de infiltração de Green-Ampt para as várias classes de solo, adaptado de Chow *et al.* (1988)

Classe do solo	Porosidade	Porosidade efetiva	Potencial matricial (cm)	Condutividade Hidráulica k_s (mmh ⁻¹)
Areia	0.437	0.417	4.95	11.78
Areia limosa	0.437	0.401	6.13	2.99
Limo arenoso	0.453	0.412	11.01	1.09
Limo	0.463	0.434	8.89	0.34
Limo siltoso	0.501	0.486	16.68	0.65
Limo argiloso arenoso	0.398	0.330	21.85	0.15
Limo argiloso	0.464	0.309	20.88	0.10
Limo argiloso siltoso	0.471	0.432	27.30	0.10
Argila arenosa	0.430	0.321	23.90	0.06
Argila siltosa	0.479	0.423	29.22	0.05
Argila	0.475	0.385	31.63	0.03

2.6. MÉTODO DA CURVA NÚMERO

Em 1978, Morel-Seytoux, utilizaram, nas suas equações, intensidades de precipitação variáveis e tiveram em conta o fluxo viscoso de ar, sem assumirem um deslocamento do tipo pistão de água.

A seguinte figura, ilustra o paradigma, através do qual as equações físicas da infiltração simulam a precipitação para um determinado evento:

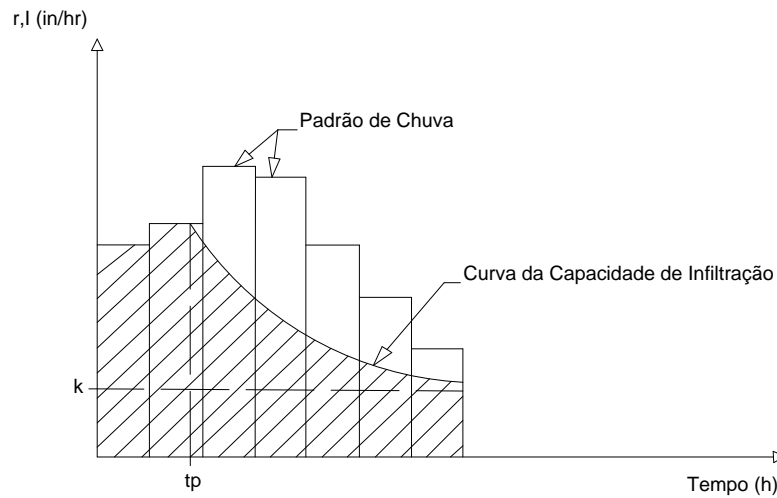


Fig.2.2 – Subtração da infiltração de um evento de precipitação, através do uso de equações físicas. (1 polegada = 25.4 mm), adaptado de Chow *et al.* (1988)

Através da observação da figura anterior, é possível verificar um período inicial onde toda a precipitação existente é infiltrada, terminando o mesmo, quando o solo começa a ficar saturado, diminuindo assim a capacidade de infiltração do solo.

Segundo Hubert *et al.* (1981), em 1972, o SCS apresentou um método para calcular a precipitação efetiva P_e (parcela da precipitação que contribui para o escoamento superficial). Para uma determinada chuvada a precipitação efetiva é menos do que a precipitação total P . Assim sendo, a água que fica retida numa bacia divide-se em duas parcelas, a que é retida antes do escoamento superficial se iniciar, I_a e a que é retida depois do escoamento se iniciar F_a . O SCS estabeleceu a seguinte hipótese de proporcionalidade entre as relações que se seguem:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (2.11)$$

Sendo S a retenção máxima por infiltração ou estagnação em pequenas áreas, dado pela seguinte expressão:

$$S = I_a + F_a \quad (2.12)$$

P a precipitação total, dada por:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2.13)$$

e P_e a precipitação efetiva dada pela seguinte equação:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2.14)$$

Experimentalmente chegou-se à seguinte relação empírica:

$$I_a = 0.2 \cdot S \quad (2.15)$$

E, substituindo a equação 2.16 na equação 2.15, obtém-se a seguinte expressão:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad (2.16)$$

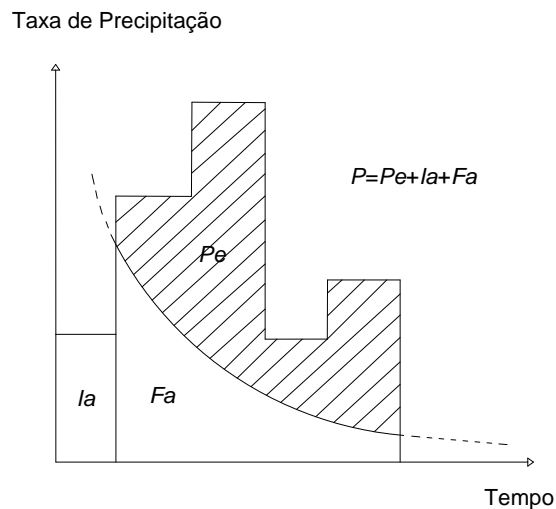


Fig.2.3 – Variáveis do método SCS para subtração da precipitação, adaptado de Chow *et al.* (1988)

Escoamento acumulado, P_e (polegadas)

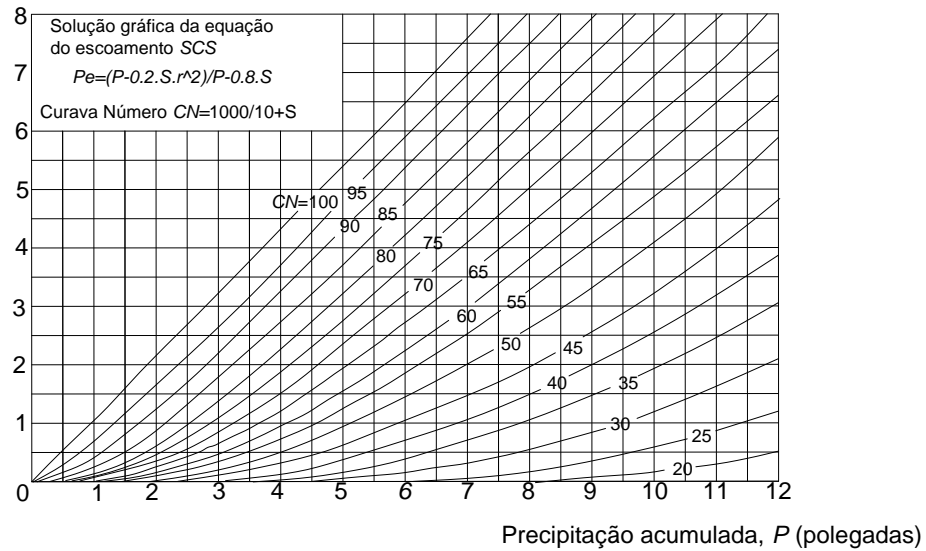


Fig.2.4 – Solução da equação do método SCS para o escoamento, adaptado de Chow *et al.* (1988)

Segundo o método SCS, é possível a previsão do escoamento, através da identificação de um único parâmetro CN , para uma dada bacia hidrográfica. Os técnicos do SCS determinaram experimentalmente a relação existente entre P e P_e , para diversas áreas e criaram curvas número padrão (CN). O valor do número do escoamento é adimensional e pode variar entre 0 e 100, tomando o valor de 100 para superfícies completamente impermeáveis e tomando valores menores que 100 para superfícies naturais.

A relação entre a retenção máxima S e o número de escoamento CN é dada por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2.17)$$

Substituindo a equação anterior na equação 2.17 vem que:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{200}{CN} + 2 \right)^2}{P + \frac{800}{CN} - 8} \quad (2.18)$$

Uma vez que esta equação foi determinada, utilizando como unidades, as polegadas, convertendo-a para milímetros (1 in=25.4 mm), obtemos a seguinte expressão:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50.8 \right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203.2} \quad (2.19)$$

Pode-se concluir então que, CN é um parâmetro único que descreve as características de geração de escoamento superficial de uma bacia hidrográfica.

O valor de CN , relativo a uma bacia hidrográfica, é então determinado, identificando, primeiramente, os vários tipos de solos e a sua ocupação, sendo os solos divididos em quatro grupos hidrológicos distintos, A, B, C e D, caracterizados, de seguida:

A – Baixo potencial de escoamento. Solos muito permeáveis com pouca argila e silte, com uma elevada taxa de transmissão de água. Os valores mais baixo de CN encontram-se nesta classificação.

B – Solos com capacidade de infiltração moderada após completo humedecimento. Solos arenosos menos profundos que os do tipo A, com uma taxa de transmissão de água moderada.

C – Solos com capacidade de infiltração baixas depois da pré-saturação. Contém uma apreciável percentagem de argila e possuem uma taxa de transmissão de água lenta.

D – Solos com o mais alto potencial de escoamento. Muitos argilosos, quase impermeáveis, possuindo uma taxa de transmissão de água muito lenta. Os valores mais altos de CN encontram-se dentro desta classificação.

Os valores de CN obtidos, tendo em conta os grupos hidrológicos do solo e os respetivos usos, mostrados anteriormente, devem ser corrigidos de maneira a complementarem a condição antecedente de humedecimento do solo. As condições antecedentes de humidade do solo existentes, "Antecedent Moisture Condition", AMC, são as seguintes:

AMC I: Solos secos abaixo do ponto de emurchecimento. Não devem ser considerados em estudos de caudais de cheia.

AMC II: A humidade corresponde à capacidade de campo. Solos húmidos que originam escoamentos médios.

AMC III: Solos muito encharcados, quase saturados, originados por chuvas persistentes durante, pelo menos, cinco dias anteriores. Situação propícia à formação das maiores cheias.

O SCS recomenda assim, que os valores de CN sejam corrigidos, tendo em conta as condições antecedentes de humidade do solo. A expressão para corrigir o valor de CN para

a condição de AMC I, tendo em conta que os valores tabelados correspondem à condição AMC II, é a seguinte:

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(AMCII)}{10 - 0.058 \cdot CN(AMCII)} \quad (2.20)$$

A seguinte expressão permite corrigir para a condição de AMC III:

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(AMCII)}{10 + 0.13 \cdot CN(AMCII)} \quad (2.21)$$

2.7 O USO DO MÉTODO DA CURVA NÚMERO EM CENÁRIOS PÓS-INCÊNCIO

Livingstone *et al.* (2005), com base em dados de 31 bacias hidrográficas, apresenta fatores de correção dos valores, traduzidos pelo rácio $CN_{pós-incêndio}/CN_{pré-incêndio}$ em função da severidade do incêndio, definidos em função da percentagem de bacia hidrográfica ardida, Figura 2.5.

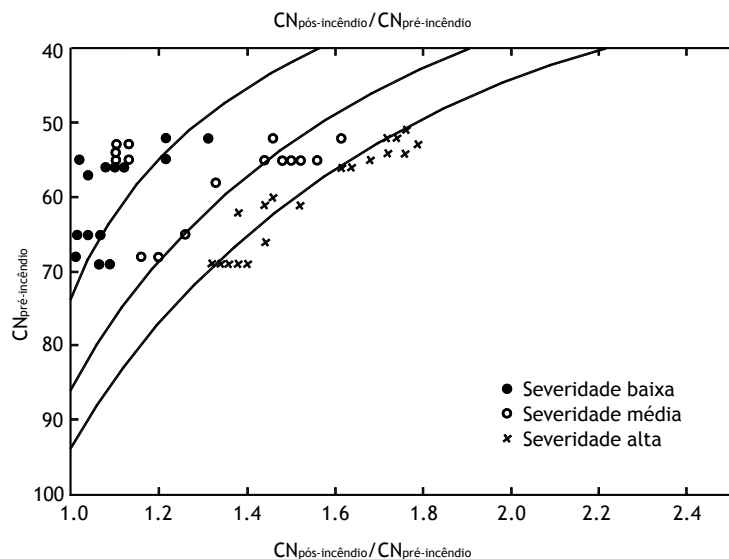


Fig.2.5 – Valores de $CN_{pré-incêndio}$ e $CN_{pós-incêndio}$ em função da severidade do incêndio, adaptado de Livingstone *et al.* (2005)

Através da análise da figura anterior é possível verificar que o rácio $CN_{pós-incêndio}/CN_{pré-incêndio}$ varia consoante os valores de $CN_{pré-incêndio}$ e do grau de severidade do incêndio.

Segundo estes autores, a maior dificuldade nesta análise é determinar qual a alteração do rácio $CN_{pós-incêndio}/CN_{pré-incêndio}$, durante o período de recuperação pós incêndio. A recuperação da mesma sub-bacia pode ter períodos de recuperação diferentes consoante os valores de

CN e consoante o grau de severidade do incêndio, isto é, quanto mais baixo for o grau de severidade, menos tempo a sub-bacia demorará a atingir o seu estado “natural”.

Os mesmos autores afirmam que, com a recuperação da bacia hidrográfica e desde que não haja perturbações subsequentes, o rácio $CN_{\text{pós-incêndio}}/CN_{\text{pré-incêndio}}$ decresce a algum ritmo, à medida que a vegetação aumenta, até atingir a sua condição natural.

2.8. MÉTODO DE ONDA CINEMÁTICA

O método a onda cinemática foi utilizado, neste trabalho, para a simulação do escoamento superficial em regime variável, nos troços de rio, encontrando-se descrito, todo este processo, no capítulo 6, do presente documento.

As equações que descrevem o modelo de Onda Cinemática derivam de uma simplificação das equações gerais de escoamento em superfície livre, designadas por equações de Saint-Venant, sendo dadas por (Chow *et al.* 1988):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - g \cdot (S_0 - S_f) = 0 \quad (2.23)$$

Sendo, Q o caudal, em m^3s^{-1} , A a área da secção transversal do escoamento, em m^2 , x a distância medida segundo a direção do escoamento, em m , t o tempo, em s , g a aceleração da gravidade, em ms^{-2} , y a profundidade do escoamento, em m , S_0 o declive do perfil longitudinal da linha de água, em mm^{-1} e S_f o declive da linha de energia, em mm^{-1} .

As equações implícitas às derivadas parciais são, respetivamente, as equações de conservação da massa e de conservação da quantidade de movimento.

O termo $\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t}$, representa a aceleração local, o termo $\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{Q^2}{A} \right)$, representa a aceleração convectiva e o termo $g \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$ representa a diferença de pressões entre as duas secções transversais extremas do volume de controlo considerado. Considerando nulos estes termos, na equação da quantidade de movimento, obtém-se o modelo de onda cinemática, dado pela seguinte equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + r \cdot s \cdot Q^{s-1} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (2.24)$$

sendo, $r = \left(\frac{P^{2/3}}{K_S \cdot S_0^{1/2}} \right)$ onde K_S é o coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler, em $m^{1/3}s^{-1}$,

S_0 o declive do perfil longitudinal da linha de água, em mm^{-1} e P o perímetro molhado da secção transversal, em m.

$$e \ s = \frac{3}{5}.$$

A aplicação deste modelo é viável, quando a altura do escoamento é reduzida, quando as forças mais importantes aplicadas ao fluido são a gravidade e o atrito e quando a velocidade do escoamento não varia significativamente, originando uma reduzida aceleração, Lencastre e Franco (1984).

2.9. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA - HEC-HMS

O *software* HEC-HMS é um sistema de Modelagem Hidrológica que permite simular os processos hidrológicos de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas. Este *software* inclui diversos procedimentos de análise hidrológica, tais como, a infiltração e permite a obtenção de hidrogramas unitários. O HEC- HMS também inclui os procedimentos necessários para a simulação contínua, incluindo a evapotranspiração e a contabilidade da humidade do solo, sendo que, os resultados obtidos através deste podem ser usados, por exemplo, para estudos de disponibilidade de água, de drenagem urbana e para a minimização, futura, dos danos causados pelas inundações. No presente trabalho, este *software* será utilizado para a modelação da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel, a fim de se compreender o seu comportamento, quando afetado pelo incêndio. Scharffenberg, Fleming. (2010).

Na Figura que se segue é possível observar o ambiente de trabalho do *software* em questão, bem como, o modelo utilizado no presente estudo e os seus elementos conceptuais:

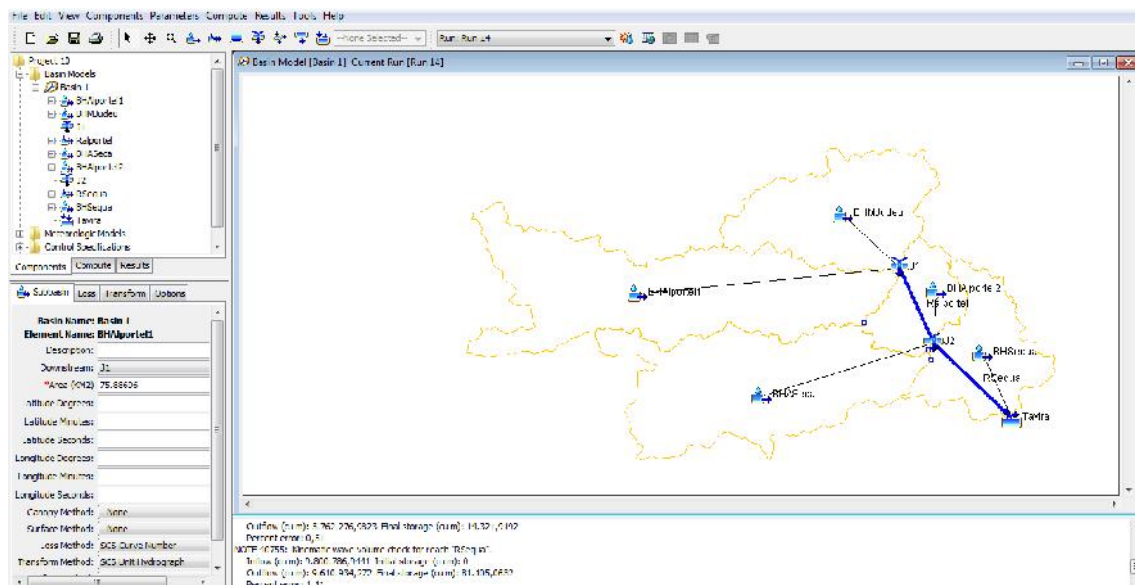


Fig.2.6 – Modelo do HEC-HMS e seus elementos

Através da observação da Figura anterior é possível observar a estrutura da bacia hidrográfica, bem como das suas sub-bacias. Os símbolos nos pontos centrais em cada uma das sub-bacias representam e caracterizam cada uma delas, os dois canais existentes, simulam os rios existentes, sendo delimitados por junções, que delimitam o início e o fim de cada rio. O ponto final, designado por Tavira, representa um sumidouro, sendo o final da bacia hidrográfica, para onde todo o escoamento é conduzido.

2.10. EROSIÃO LOCALIZADA DE PILARES

2.10.1. INTRODUÇÃO

A erosão localizada de pilares é a maior causa de rutura de pontes, sendo um fenómeno bastante complexo, resultante da forte interação do escoamento turbulento tridimensional em redor do obstáculo, com o leito de sedimentos, Lima (2008). Segundo Teixeira (2013), a causa da erosão pode também estar relacionada com a variação dos caudais naturais e com as características topográficas do curso de água.

O processo de erosão pode ser classificado em processo de erosão geral ou processo de erosão localizada. O primeiro deriva dos elevados caudais, da existência de curvas ou confluências de escoamento, não dependendo da existência de obstáculos. O segundo assume a forma de erosão local quando junto de obstáculos, se verificar a diminuição da secção do escoamento, provocada por os mesmos ou por uma diminuição natural da secção de escoamento do rio, Pinheiro (2010).

Segundo Pinheiro (2010), as erosões localizadas são o corolário da alteração normal do escoamento, provocando a remoção de sedimentos originando, posteriormente, cavidades de erosão. As erosões localizadas podem ser definidas como processos complexos, relativos a estruturas tridimensionais do escoamento, que se observam junto de obstruções ao mesmo, podendo conduzir à rotura parcial ou ao colapso das mesmas. Moreno *et al.* (2014).

Arneson *et al.* (2012) afirma que o mecanismo básico que causa o descalçamento local em pilares é a formação de vórtices na sua base, resultantes da compressão da água na superfície a montante da obstrução, acelerando o fluxo em torno da face do pilar. Da ação do vórtice, resulta a remoção do material do leito, em torno da base do pilar, transportando os sedimentos aí existentes e desenvolvendo uma cavidade com uma determinada profundidade. À medida que a profundidade de erosão aumenta, a resistência do vórtice diminui, reduzindo, por conseguinte, a velocidade de transporte.

Relativamente aos pilares, estes podem ser classificados como simples, ou complexos. Os pilares simples apresentam continuidade axial da forma da respetiva fundação e os pilares complexos são constituídos pelo fuste ou pilar propriamente dito, fundado num maciço de encabeçamento, suportado por um conjunto ou grupo de estacas (Moreno *et al.* 2014).

Vários acidentes têm acontecido em todo mundo devido a quedas de pontes, Pinheiro (2010). Segundo Teixeira (2013), as pontes desempenham a função de ligação territorial e de comunicação, sendo uma das infraestruturas mais importantes nas sociedades atuais. Do ponto de vista da Engenharia Civil uma ponte é uma estrutura que permite a transposição de linhas de água, possuindo, muitas vezes, elementos de fundação implantados no leito de rios

contendo material aluvionar, como areia, gravilha, siltes e argila, Silva (2008). A erosão localizada nos pilares de pontes, fundados em leitos de rios, é a maior causa de rotura de pontes, sendo que os principais danos ocorrem durante eventos de cheia, Pinheiro (2010). Numa primeira fase, antes da rotura e da queda dos pilares, poderá ocorrer o assentamento dos mesmos, devido aos fenómenos de erosão referidos. Silva (2008).

O processo de erosão de um pilar de uma ponte pode ser descrito por determinadas variáveis independentes, tais como, variáveis de escoamento não perturbado, como por exemplo, a profundidade de fluxo, o declive da linha de energia e a aceleração da gravidade, variáveis dos fluidos, como a densidade de massa e a viscosidade cinemática, variáveis dos sedimentos do leito, como o tamanho médio, o coeficiente de graduação e a densidade de massa, variáveis que caracterizam o pilar, como por exemplo, a largura, o fator de inclinação angular e o fator de forma do mesmo, variáveis que descrevem a geometria do canal, como a largura da seção transversal, o declive do leito e o fator de forma da seção transversal, e o tempo. (c.f. Fael 2007).

No que diz respeito às cavidades de erosão resultantes, é possível considerar a existência de três fases de evolução, nomeadamente a fase inicial, em que a profundidade máxima da cavidade de erosão aumenta muito rapidamente, a fase principal, em que a cavidade se acentua em profundidade e em extensão, embora a um ritmo, progressivamente, decrescente e a fase de equilíbrio em que a cavidade de erosão deixa de evoluir, Pinheiro (2010).

Segundo Lima (2008), a profundidade da cavidade de erosão aumenta com o diâmetro do pilar, para um igual número de Froude do escoamento e com o tempo, não se verificando variação da mesma, com a dimensão longitudinal do pilar.

Segundo Moreno *et al.* (2014), existem imensos estudos acerca desta temática, porém ainda não se atingiu com sucesso absoluto as propostas e métodos para prever a profundidade máxima das cavidades de erosão, devido ao facto de existirem muitos fatores que influenciam o processo erosivo. De entre eles destacam-se o efeito da velocidade do escoamento, que está diretamente relacionado com o caudal escoado, o efeito do tempo, o efeito da forma do pilar e da sua orientação em relação ao escoamento e o efeito do tamanho dos sedimentos do leito.

O estudo dos fenómenos de erosão é feito, através da análise das condições que influenciam o desenvolvimento das correspondentes cavidades e através de aplicação de algumas ferramentas de previsão das profundidades atingidas. A técnica de previsão mais utilizada é a aplicação de expressões analíticas desenvolvidas a partir de experiências laboratoriais ou através de dados registados em campo, contudo a aplicação destas nem sempre produz resultados válidos, Silva (2008).

Segundo Silva (2008), atualmente, não é possível impedir por completo a ocorrência de fenómenos de erosão junto de pilares de pontes fundados em leitos aluvionares, porém existem algumas medidas possíveis de adotar, que visam a minimização desses fenómenos e a proteção destes elementos. A solução mais aplicada é a colocação de enrocamento natural, em redor dos elementos de fundação, para que este seja capaz de resistir às ações do escoamento, impedindo também a remoção do material mais fino.

2.10.2. HEC-18-AVALIAÇÃO DA EROSIÃO EM PONTES

O HEC-18, referente “Avaliação da Erosão em Pontes”, é um documento que expõe o conhecimento e a prática para a conceção, avaliação e inspeção de pontes, relativamente à erosão. Faz parte de um conjunto de documentos, que fornecem orientações acerca do descalçamento em pontes e analisam a estabilidade sob as forças das correntes, sendo esses documentos o HEC-20, intitulado de “Fluxo de Estabilidade em Estruturas Rodoviárias” e o HEC-23, “Erosão em Pontes e medidas para contrariar a instabilidade induzida pelo fluxo”.

No presente trabalho utilizou-se a quinta edição do HEC-18 que contém agora revisões obtidas a partir de outras pesquisas, nomeadamente a incorporação de parte do *Florida Scour Manual*, publicado em 2010. Neste documento são desenvolvidos dados hidrológicos e hidráulicos detalhados, com uma abordagem específica, tendo em conta o nível de complexidade, as características e os problemas da estrutura a analisar.

Este documento visa analisar o descalçamento existente nas fundações, causado pela erosão da água no solo. Segundo Ameson *et al.* (2012), a causa mais comum do colapso de pontes, é o descalçamento das fundações, causado pelas inundações. De forma a minimizar esse risco é então necessário dar uma atenção especial a estas estruturas, devendo as mesmas ser alvo de uma avaliação, quanto à sua vulnerabilidade a inundações, a fim de se tomar medidas prudentes e adequadas.

Enquanto a maioria das investigações acerca do descalçamento de pilares de pontes centra-se sobre pilares simples, dando pouca importância à determinação de profundidades de descalçamento relativas a pilares complexos, este documento trata com relevância esta situação, fornecendo métodos que estimam com razoabilidade as erosões para uma grande variedade de pilares complexos.

No que diz respeito a novas estruturas, a filosofia passa então por projetá-las não para os efeitos da erosão causados pelas cheias de projeto, mas sim para cheias maiores do que as cheias de projeto, Ameson *et al.* (2012).

3. PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DOS SOLOS

O presente capítulo é dedicado à determinação das propriedades físicas e hidráulicas de dois solos distintos, tendo um deles sido recolhido na Serra Algarvia, mais especificamente a norte de São Brás de Alportel, e o outro na zona Litoral Algarvia, nomeadamente na região do Ludo em Faro. A caracterização dos mesmos foi realizada em duas fases distintas, sendo a primeira correspondente às condições iniciais, ou seja pré-incêndio, e a segunda para condições pós-incêndio.

O objetivo da determinação das propriedades físicas e hidráulicas destes solos, antes e depois do incêndio, irão permitir determinar a influência deste fator externo sobre as suas propriedades dos solos e quantificar o efeito dos incêndios sobre a capacidade de retenção de água no solo.

Foram realizados sete ensaios distintos a ambos os solos, sendo eles, o ensaio para obtenção do teor em água e a percentagem de matéria orgânica, o ensaio granulométrico por peneiração húmida, o ensaio para a determinação da porosidade do solo, o ensaio para a determinação da densidade das partículas do solo, o ensaio granulométrico por sedimentação, o ensaio de simulação de incêndio e o ensaio de infiltração.

Os ensaios nos solos do Litoral Algarvio foram realizados no âmbito da presente dissertação, e os ensaios realizados ao solo da Serra Algarvia foram realizados por Lança *et al.* (2014), sendo também apresentados neste capítulo.

3.1. ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO TEOR EM ÁGUA E DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

O teor em água no solo corresponde à relação entre a massa de água e massa de solo seco de uma amostra de solo. Os ensaios para a determinação do teor em água no solo foram realizados de acordo com a norma portuguesa NP-84 de 1965.

As amostras sobre as quais se realizaram os ensaios para determinação do teor em água foram retiradas das caixas metálicas retangulares, correspondentes às amostras A, B, C e D, do solo original de cada zona estudada. Estas, por sua vez, tinham sido previamente recolhidas em campo, à custa da cravação no terreno de 4 caixas metálicas quadrangulares, com as dimensões 50x50x25 cm, e transportadas para laboratório. As amostras deverão corresponder o mais possível à mesma mancha de empréstimo, de modo a manter a homogeneidade e representatividade das propriedades iniciais dos solos.

Na Figura que se segue é possível observar as quatro amostras de solo recolhidas em campo:

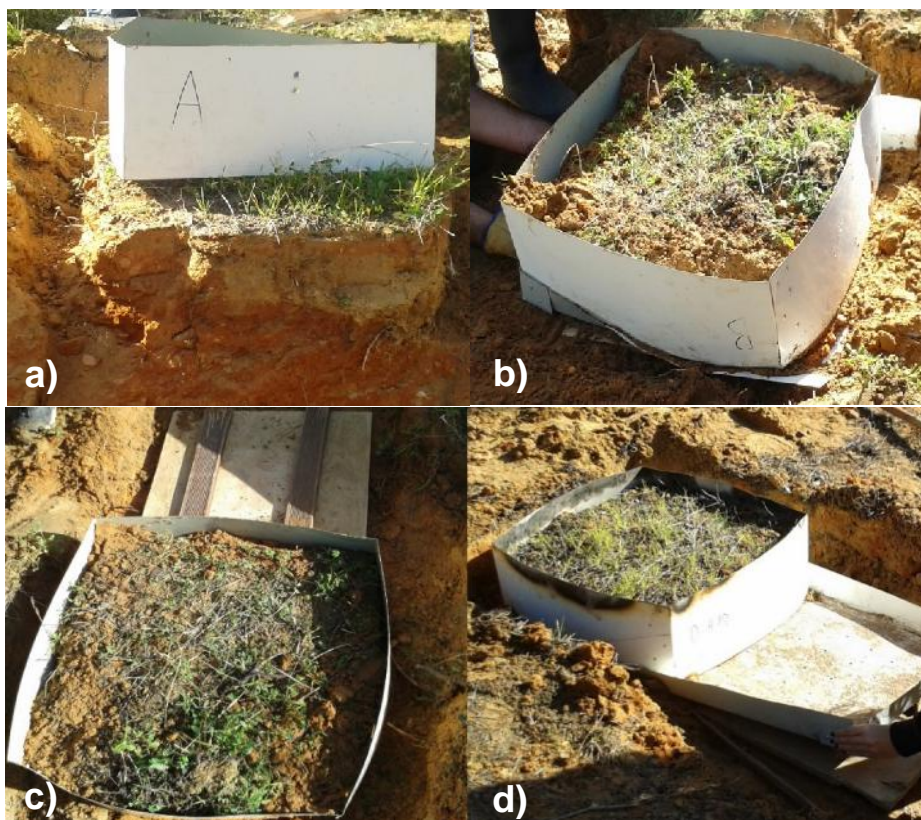


Fig. 3.1 – Recolha das amostras do solo em campo

3.1.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a execução destes ensaios utilizaram-se cápsulas metálicas, uma balança para pesagens com um limite de erro de 0.01 g e uma estufa de secagem capaz de manter uma temperatura até $100^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ de acordo com a norma NP-84 de 1965.

3.1.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Primeiramente, retiraram-se pequenas porções de cada uma das quatro amostras (A, B, C e D), quer do solo do litoral quer da serra algarvia, antes da simulação do incêndio em laboratório, colocando-se cada uma delas em cápsulas separadas, devidamente identificadas. De seguida, e tendo em conta o peso da própria cápsula, pesou-se cada uma das cápsulas, com o respetivo solo.

Posteriormente, colocaram-se as cápsulas, com as respetivas amostras, em estufa, a uma temperatura de 60°C . Esta temperatura é considerada a temperatura a partir da qual se começa a queimar matéria orgânica, caso ela exista no solo.

Passadas 24 horas, pesaram-se as cápsulas com os solos “seco” a 60°C e aumentou-se a temperatura para 100°C .

Passadas outras 24 horas, voltou-se a pesar as cápsulas com o solo seco a 100°C e mais uma vez aumentou-se a temperatura da estufa, com vista a determinação da percentagem de matéria orgânica no solo pelo método de ignição. Neste caso, a temperatura aplicada foi apenas de 240°C, bastante abaixo da temperatura usualmente utilizada no método de ignição para determinação deste parâmetro, que são 600°C. Contudo, por falta de equipamento com capacidade para atingir essas temperaturas, aplicou-se o máximo que se tinha ao dispor no laboratório de geotecnia do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve. Após 24 horas voltou-se a pesar as cápsulas.

A determinação do teor em água do solo foi de igual modo executado após a realização do incêndio sobre as amostras B, C e D para diferentes quantidades de matéria combustível, no entanto, nesta fase apenas foi considerada a temperatura de 100°C.

3.1.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

A determinação do teor em água e percentagem de matéria orgânica no solo, para as amostras em questão, foram determinadas tendo em conta a Equação 3.1 e 3.2, respetivamente:

$$\text{TeorÁgua} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (3.1)$$

sendo, m_1 a massa da cápsula, m_2 a massa da cápsula e da amostra de solo antes da secagem e m_3 a massa da cápsula e da amostra de solo seca a uma temperatura de 60°C .

$$\% \text{MatOrgânica} = 100 \times \frac{m_4 - m_5}{m_4 - m_1} \quad (3.2)$$

em que m_4 é a massa da cápsula e da amostra de solo seca a uma temperatura de 103°C e m_5 a massa da cápsula e da amostra de solo seca a uma temperatura de 240°C.

3.1.3.1. Solos do Litoral Algarvio

De todas as amostras A, B C e D foram sempre retiradas 3 amostras para determinação do teor em água, perfazendo um total de 12 cápsulas (Figura 3.2), daí que se indique um valor médio para cada uma delas.



Fig. 3.2 – Amostras do solo utilizadas para a determinação do teor em água e da matéria orgânica

Os valores obtidos para o teor em água do solo médio, antes do incêndio e após o incêndio são dados em anexo (Anexo 1, 2, 3 e 4), e estão resumidos no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 – Teor em água médio do solo antes da simulação de incêndio e após da simulação do incêndio

Nº do ensaio	A	B	C	D
Teor em água médio a 60°C (%) -Antes do incêndio	0.74	0.90	0.78	0.99
Teor em água médio a 100°C (%) - Antes do incêndio	0.87	1.03	0.93	1.05
Teor em água médio a 240°C (%) - Antes do incêndio	2.63	2.72	2.19	2.84
Teor em água médio a 100°C (%) - Após o incêndio	0.80	0.55	0.65	0.38

Com base nos resultados é possível verificar que o teor em água médio é sensivelmente idêntico em cada uma das amostras A, B, C e D, nas três primeiras linhas, ou seja antes da simulação de incêndio. Após o incêndio ocorre uma redução deste parâmetro, podendo-se apenas comparar os valores da linha 2 e 4, correspondentes aos 100°C, embora o solo não fique completamente seco mesmo após o incêndio, ou seja este parâmetro não chega a zero. De qualquer modo, observa-se uma diminuição do teor em água no solo, quando a quantidade de matéria combustível utilizada no incêndio aumenta. Este fenómeno é justificável porque o solo atinge maiores temperaturas.

Os valores da percentagem de matéria orgânica no solo, a 240°C, são determinados, de igual modo, com base numa relação entre massas, podendo a expressão ser consultada no Anexo 5, bem como os resultados alcançados. De salientar que os valores registados são relativamente baixos, visto que a estufa atingiu apenas os 240°C, tendo-se tido como valor de referência a massa do solo a 100°C. De qualquer modo, valores superiores da temperatura iriam não só queimar a matéria orgânica existente no solo como também eliminar a água adsorvida existentes entre as partículas finas da argila, obtendo-se valores superiores de MOS, embora superestimados de acordo com diversas fontes bibliográficas. Assim sendo, os

valores de percentagem de matéria orgânica apresentados, de forma resumida, no Quadro 3.2, são inferiores aos esperados e carecem de confirmação com outros métodos de determinação da MOS (Anexo 5).

Quadro 3.2 – Percentagem de matéria orgânica para as doze amostras de solo, a 240°C

Nº do ensaio	A			B			C			D		
Matéria orgânica no solo (%)	1.9	2.74	1.53	1.64	1.69	1.61	1.17	1.38	1.14	2.33	2.33	1.74
Média de Matéria orgânica no solo (%)	1.64											

De realçar que a média de todos os resultados apresentados dará 1,77%, contudo considerou-se que valores muito díspares da média, quer acima (2.74, 2.33 e 2.33) quer abaixo (1.17 e 1.14), não deveriam ser considerados e assim sendo o valor médio alcançado foi de 1.64%.

3.1.3.2. Solos da Serra Algarvia

Os resultados dos ensaios referentes aos solos da Serra Algarvia são apresentados em Lança *et al.* (2014), contudo, no âmbito desta dissertação estes resultados são utilizados e apresentam-se alguns valores detalhados que não são indicados na referência original. Os valores obtidos no ensaio do teor em água para uma temperatura de 100°C, após a realização da simulação de incêndio, são apresentados, resumidamente no Quadro 3.3:

Quadro 3.3 – Teor em água, para 100°C, após a realização da simulação de incêndio

Nº do ensaio	A		B		C		D	
Nº da cápsula	130	139	62A	109	121	20	22	26
Teor em água médio a 100°C	2.49		2.02		1.73		1.55	

Os valores da percentagem de matéria orgânica no solo, a 240°C, são apresentados, de forma detalhada, no Anexo 6 e de forma resumida no Quadro 3.4:

Quadro 3.4 – Percentagem de matéria orgânica para as doze amostras de solo, a 240°C

Nº da cápsula	11	3	34	9	10	5
% Matéria orgânica no solo	2.71	2.47	2.56	2.82	2.87	2.48
% Média de Matéria orgânica no solo	2.65					

Comparando os resultados da linha quatro do quadro 3.1 com os resultados do quadro 3.3, observa-se que os teores em água são similares a nível de tendência, ou seja, o teor em água decresce para maiores quantidades de matéria orgânica queimada. Para além disso, é ainda possível verificar que o teor em água nos solos da Serra Algarvia é superior aos solos do Litoral Algarvio.

Comparando agora a percentagem de matéria orgânica, constata-se, tal como seria de esperar, que os solos da Serra Algarvia apresentam maior quantidade de matéria orgânica que os solos do Litoral Algarvio, face à sua composição granulométrica e origem.

3.2. ENSAIO GRANULOMÉTRICO POR PENEIRAÇÃO HÚMIDA

O ensaio granulométrico por peneiração húmida é um ensaio realizado segundo a documentação normativa E239 - 1970 e consiste na determinação da massa, em percentagem, de cada porção de material constituinte de um determinado solo, em relação a massa total do solo que é ensaiado.

Através dos resultados obtidos por este ensaio é possível traçar-se a curva de distribuição granulométrica, permitindo assim obter uma adequada classificação deste.

3.2.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a realização deste ensaio utilizaram-se, da série de peneiros normalizados de malha quadrada, os peneiros com aberturas de 76.1 mm, 50.8 mm, 38.1 mm, 25.4 mm, 19.0 mm, 9.51 mm, 4.76 mm (nº4), 2,0 mm (nº10), 0.850 mm (nº20), 0.425 mm (nº40), 0.250 mm (nº60), 0.106 mm (nº140) e 0.075 mm (nº200), uma balança para pesagens com um limite de erro de 0.01 g, um almofariz e um pilão de porcelana, para efetuar a desagregação dos torrões da amostra de solo, uma estufa de secagem capaz de manter uma temperatura até 100°C, repartidores, cápsulas metálicas, um copo de precipitação com 600 cm³ e um frasco de lavagem por esguicho, uma vareta de vidro e uma solução de hexametáfosfato de sódio comercial.

3.2.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O ensaio teve início com a preparação das amostras por via húmida. Passou-se, primeiramente, por peneirar uma quantidade significativa do material grosso, com recurso ao peneiro nº10 (2.0 mm), pesando-se e determinando-se as massas das frações do material que ficou retido no peneiro, bem como aquele que passou no mesmo.

O material que ficou retido no peneiro de 2.0 mm foi lavado, voltando a ser peneirado através dos peneiros 76.1 mm, 50.8 mm, 38.1 mm, 25.4 mm, 19.0 mm, 9.51 mm, 4.76 mm (nº4),

começando-se pelo peneiro de malha mais larga. Por fim, determinaram-se as massas das frações retidas em cada peneiro, anotando-se.

Em relação ao material que passou no peneiro de 2.0 mm, tendo em conta que se trata de um solo arenoso colocou-se, no copo de precipitação, 100 gramas do mesmo, juntando-se 250 ml de água corrente, onde se tinha dissolvido previamente 0.5 gramas de hexametáfosfato de sódio. Misturou-se muito bem, todos estes materiais constituintes, com uma vareta de vidro deixando-se repousar durante uma hora, mexendo-os, algumas vezes.

Passado uma hora, colocou-se a suspensão num peneiro de 0.075 mm (nº200), lavando-se o material com recurso a um jato de água, desprezando-se o material que passou através do peneiro.

De seguida, transferiu-se o material retido no peneiro para uma capsula e secou-se em estufa a 100°C, durante aproximadamente, dois dias.

Passados dois dias, peneirou-se o material, através dos peneiros de 0.850 mm (nº20), 0.425 mm (nº40), 0.250 mm (nº60), 0.106 mm (nº140) e 0.075 mm (nº200), realizando movimentos horizontais de translação e de rotação. Por fim, determinaram-se por pesagem as massas das frações do material retido em cada peneiro

3.2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.2.3.1. Solos do Litoral Algarvio

Os valores obtidos, neste ensaio, encontram-se em anexo (Anexo 7), podendo-se, no entanto, concluir que este solo se trata de uma areia, possuindo apenas 18.6 % de finos, sendo esta classificação alvo de um maior rigor e precisão, quando obtida pelo ensaio granulométrico por sedimentação, que será apresentado mais à frente.

Na Figura 3.3 é possível observar a fração de solo retida e passada no peneiro de 2.0mm, bem como, a suspensão relativa ao material que passou no mesmo peneiro:



Fig. 3.3 – a) Fração de solo retida e passada, respetivamente, no peneiro de 2.0mm; b) Suspensão relativa ao material que passou no peneiro de 2.0mm

3.2.3.2. Solos da Serra Algarvia

Este ensaio foi realizado, por Lança, *et al.* (2014), encontrando-se os resultados obtidos, no anexo 8, podendo-se concluir que se trata de um solo arenoso, no entanto, com uma quantidade de finos superior ao solo anterior, 31.1 % de finos, sendo, no entanto, esta classificação mais precisa e clara, quando obtida pelo ensaio granulométrico por sedimentação, apresentado mais à frente. Na figura seguinte é possível observar a fração de solo retida e passada no peneiro de 2.0mm:



Fig. 3.4 – Fração de solo retida e passada no peneiro de 2.0mm

3.3. ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA POROSIDADE DO SOLO

3.3.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a realização deste ensaio utilizam-se as amostras recolhidas previamente no campo, com os provetes metálicos cilíndricos ocos (Figura 3.5), redes plásticas com uma malha muito fina, de forma a não deixar passar material do solo, elásticos, uma balança para pesagens com um limite de erro de 0.01 g, dois recipientes com água, para colocar as amostras e uma estufa de secagem capaz de manter uma temperatura até 250°C.



Fig. 3.5 – Amostradores cilíndricos utilizados na recolha das amostras

3.3.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Primeiramente passou-se à recolha de quatro amostras de solo não remexido (Figura 3.6). Para tal, cravaram-se amostradores cilíndricos no solo, com a ajuda de um martelo, colocando-se de seguida, duas tampas metálicas, uma na base e outra no topo da amostra, de modo a confinar o solo ao seu volume cilíndrico. Este procedimento foi executado para as quatro amostras, transportando-as seguidamente, para o laboratório de geotécnica da Universidade do Algarve.



Fig. 3.6 – Recolha de amostras na Serra

Posteriormente, em laboratório, retiraram-se as duas tampas metálicas de cada uma das amostras, colocando-se na base e no topo da cada uma destas, uma rede com uma malha muito fina, presa por uma faixa, de modo a que a amostra não perdesse parte do seu material constituinte.

De seguida, efetuou-se a pesagem de cada uma das amostras, separadamente, colocando-se as quatro amostras em recipientes com água, para que as mesmas ficassem imersas na água, a fim de se determinar a massa do solo saturado (Figura 3.7).

Passados quatro dias, retiraram-se as quatro amostras dos recipientes, com água, onde se encontravam, pesaram-se as mesmas e colocaram-se em estufa a 100°C, durante dois dias, a fim de se obter a massa do solo seco. Após esta pesagem, descofraram-se as mesmas quatro amostras, e mediu-se o peso próprio de cada provete, já sem o solo, juntamente com o material acessório que constituía a amostra.



Fig. 3.7 – a) Pesagem das amostras recolhidas; b) Colocação das amostras em recipientes com água

3.3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

O peso volúmico húmido foi determinado de acordo com a Equação 3.3, para os quatro provetes:

$$\gamma_h = \frac{Sr \times e + G}{1 + e} \times \gamma_w \quad (3.3)$$

sendo Sr o grau de saturação do solo, dado pela expressão 3.4, e o índice de vazios, G a densidade das partículas solidas do solo e γ_w o peso volúmico da água que equivale a 9.81 (kNm⁻³).

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \quad (3.4)$$

Sendo V_w o volume de água no solo e V_v a soma do volume de água com o volume de ar no solo.

Quando se trata de um solo completamente seco, o grau de saturação é zero, obtendo-se a seguinte expressão para o peso volúmico seco:

$$\gamma_d = \frac{G}{1 + e} \times \gamma_w \quad (3.5)$$

Quando se trata de um solo completamente saturado, o grau de saturação é 1, obtendo-se a seguinte expressão para o peso volúmico saturado:

$$\gamma_{sat} = \frac{e + G}{1 + e} \times \gamma_w \quad (3.6)$$

De acordo com a Equação 3.7, finalmente, é possível obter a porosidade do solo, para os quatro provetes,

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (3.7)$$

sendo e o índice de vazios médio do solo.

O cálculo da porosidade volumétrica, n , e da porosidade efetiva, n_e , também foi realizado, para os dois tipos de solo, tendo em conta as seguintes expressões:

$$m_{\text{ÁguaSolo}} = m_{\text{SoloSat}} - m_{\text{SoloSeco}} \quad (3.8)$$

$$V_{\text{Água}} = \frac{m_{\text{ÁguaSolo}} \cdot 10^{-3}}{1000} \quad (3.9)$$

$$n = \frac{V_{\text{água}} \cdot 10^3}{V_{\text{proвете}} \cdot 10^3} \quad (3.10)$$

sendo n , a porosidade volumétrica do solo.

Tendo em conta o valor da densidade das partículas sólidas dos provetes, G , o respetivo peso da água, W_w , e o peso do solo seco, W_s , obtidos através dos ensaios laboratoriais, vem que:

$$V_w = \frac{W_w}{1000} \quad (3.11)$$

$$V_{\text{Solo}} = \frac{W_s}{G \cdot 1000} \quad (3.12)$$

$$n_{\text{residual}} = \frac{V_w}{V_{\text{Solo}}} \quad (3.13)$$

Assim sendo, chegamos ao valor final de $\Delta\theta$, dado pela seguinte expressão:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_{\text{residual}} \quad (3.14)$$

3.3.3.1. Solos do Litoral Algarvio

Os valores obtidos para cada um dos quatro provetes, encontram-se em anexo (Anexo 9), estando resumidos no quadro seguinte (Quadro 3.5):

Quadro 3.5 – Valores de d , h , s_{at} , G , e , n , e de σ_v , para os quatro provetes

Provetes	A	B	C	D
d (kNm ⁻³)	19.41	19.83	14.64	15.14
h (kNm ⁻³)	20.46	20.88	15.82	16.01
s_{at} (kNm ⁻³)	22.55	22.73	19.48	19.72
G	2.59	2.59	2.59	2.59
e	0.27	0.24	0.67	0.63
n (%)	21.05	19.62	40.29	38.49
	0.32	0.30	0.49	0.47
	0.31	0.29	0.48	0.46

Com base nos resultados indicados no quadro 3.5 observa-se que a porosidade das amostras A e B são similares e rondam os 20%, contudo já as amostras C e D apresentam porosidades que rodam quase o dobro, ou seja 39%. Este resultado tão dispare deve-se ao facto de as duas primeiras amostras terem sido retiradas de uma zona contígua e as outras duas terem sido recolhidas de escasso metros mais ao lado. Face a isto, em futuras conclusões, principalmente quando associadas à determinação das propriedades hidráulicas destas amostras, tal aspeto deverá ser tido em atenção.

3.3.3.2. Solos da Serra Algarvia

Os resultados obtidos para cada um dos quatro provetes, encontram-se em anexo (anexo 10), sendo resumidos pelo seguinte quadro (Quadro 3.6):

Quadro 3.6 – Valores de d , h , s_{at} , G , e , n , e de σ , para os quatro provetes

Provetes	A	B	C	D
d (kNm ⁻³)	10.89	12.56	13.24	13.81
h (kNm ⁻³)	12.56	14.32	15.34	15.95
s_{at} (kNm ⁻³)	17.02	17.92	18.39	18.73
G	2.53	2.53	2.53	2.53
e	1.18	0.91	0.81	0.74
n (%)	54.16	47.75	44.81	42.55
	0.63	0.55	0.53	0.50
	0.60	0.52	0.50	0.47

No caso do solo da Serra Algarvia, verifica-se que os resultados são relativamente idênticos para as 4 amostras recolhidas em campo, podendo-se atribuir uma porosidade média de 45% para o mesmo. As ligeiras discrepâncias nos valores obtidos devem-se ao facto de solos serem materiais naturais e como tal heterogêneos, principalmente à superfície, em que os solos apresentam-se mais descomprimidos e exposto a fatores naturais e antropogénicos.

3.4. ENSAIO DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DAS PARTÍCULAS DO SOLO

Este ensaio é realizado segundo a norma portuguesa NP-83 de 1965 e consiste na determinação da densidade das partículas do solo.

3.4.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a concretização deste ensaio foram utilizados dois picnómetros de 100 ml cada um, a fim de poder obter valores mais precisos, um termómetro para a determinação das temperaturas, um peneiro de malha quadrada de 4.76 mm, de abertura, uma cápsula metálica, um exsiccador com sílica-gel, uma balança de pesagem com limites de erro de 0.01 g e uma estufa para secagem capaz de manter uma temperatura até 100°C.

3.4.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O presente ensaio inicia-se com a peneiração do solo através do peneiro de malha quadrada de 4.76 mm. Da amostra de solo que passa neste peneiro, pesou-se, em separado, duas porções de 25g, cada uma e colocou-se em estufa a 100°C, sendo estes os dois provetes utilizado neste ensaio.

Seguidamente, procedeu-se à calibragem dos dois picnómetros. Para isso, passou-se, primeiramente, por lavar cada um dos picnómetros com água, secá-los e pesá-los, separadamente. Após concluída esta primeira fase, colocou-se água destilada, em cada um dos picnómetros, até ao traço de referência, pesou-se os mesmos e mediu-se a temperatura da água de cada picnómetro, despejando-se, por fim, o picnómetro.

Feita a calibração dos picnómetros iniciou-se então a determinação da densidade de partículas, com secagem prévia dos provetes. De seguida introduziu-se o provete numa cápsula tarada, manteve-se em estufa, aproximadamente, a 100°C, até atingir uma massa constante e colocou-se no exsiccador para arrefecer, pesando-se, posteriormente. Seguidamente, transferiu-se o provete para o picnómetro, enchendo-se este com água destilada, até cerca de três quartos da sua capacidade total, deixando-se embeber durante 12 horas. Este processo foi feito, para os dois provetes, de igual modo. Passadas as 12 horas, extraiu-se o ar remanescente dos provetes, por ebulição e agitação, através de uma placa de aquecimento, durante 10 minutos. Deixou-se os picnómetros repousarem até o seu conteúdo atingir a temperatura ambiente e acrescentou-se água destilada até ao traço de referência, enxugando-se cuidadosamente e pesando-se os mesmos. Por fim, mediu-se a temperatura do conteúdo dos dois picnómetros. Nas Figuras seguintes é possível observar o procedimento do ensaio:

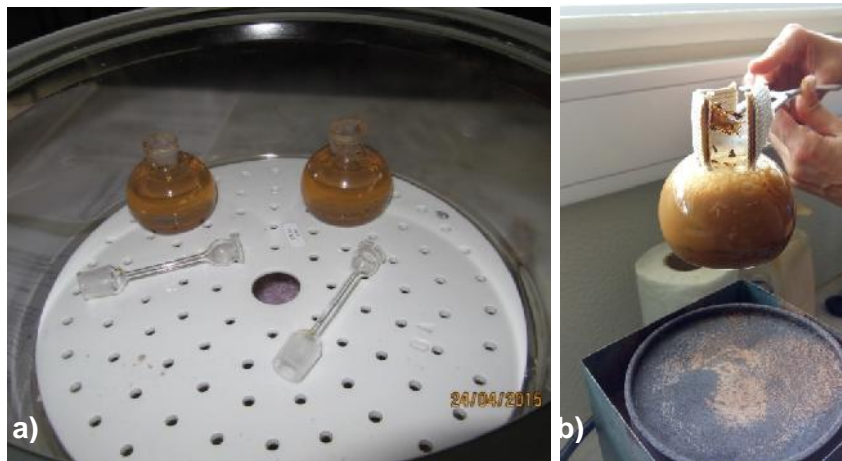


Fig. 3.8 – a) Arrefecimento dos Picnómetros no exsiccador; b) Aquecimento do provete para extração do ar



Fig. 3.9 – Aquecimento dos dois provetes para extração do ar

3.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

A determinação da densidade das partículas sólidas foi realizada através da Equação 3.15:

$$d = K \times \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \quad (3.15.)$$

sendo K o quociente entre a densidade da água à temperatura T_x e 20°C , m_4 a massa do solo seco, m_3 a soma da massa do picnómetro, com a água à temperatura T_x e m_5 a soma da massa do picnómetro, com a mistura, à temperatura T_x .

3.4.3.1. Solos do Litoral Algarvio

Assim sendo, os resultados obtidos encontram-se forma resumida no Quadro 3.7, as fichas de ensaio podem se consultadas no anexo 11:

Quadro 3.7 – Densidade das partículas sólidas para os dois picnómetros

Nº da Cápsula	7	17
Densidade das Partículas- d (g)	2.58	2.59

3.4.3.2. Solos da Serra Algarvia

Os valores obtidos, neste ensaio, são apresentados no Quadro 3.8 e as fichas com os resultados detalhados podem ser consultadas no anexo 12:

Quadro 3.8 – Densidade das partículas sólidas para os dois picnómetros

Nº da Cápsula	C23	C19
Densidade das Partículas- d (g)	2.54	2.52

Os resultados alcançados para a densidade das partículas sólidas dos solos e indicadas quer no quadro 3.7 quer no quadro 3.8, são praticamente idênticos e refletem a correta execução do ensaio.

3.5. ENSAIO GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTAÇÃO

O ensaio granulométrico por sedimentação é um ensaio realizado segundo a documentação normativa E196 - 1966 e consiste em determinar a distribuição, em mm, das partículas finas que constituem um solo, ou seja, o silte e a argila.

Através dos resultados obtidos por este ensaio é possível obter-se uma distribuição granulométrica mais precisa do solo, quando comparada com o ensaio granulométrico por peneiração húmida.

3.5.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a realização deste ensaio utilizou-se, um agitador elétrico, um densímetro graduado, um termómetro graduado, um provete de 100 cm³ e outro de 1000 cm³, peneiros ASTM de malha quadrada, de 76.1 mm, 50.8 mm, 38.1 mm, 25.4 mm, 19.0 mm, 9.51 mm, 4.76 mm (nº4), 2,0 mm (nº10), 0.850 mm (nº20), 0.425 mm (nº40), 0.250 mm (nº60), 0.106 mm (nº140) e 0.075 mm (nº200), uma balança para pesagens com um limite de erro de 0.01 g, um almofariz e um pilão de porcelana, uma estufa de secagem capaz de manter uma temperatura até 100°C, repartidores, cápsulas metálicas, um frasco de Erlenmeyer, um funil de Buchner, um frasco de Kitassato, um cronómetro, uma régua graduada, exsicador, um frasco de lavagem por esguicho, uma vareta de vidro, papel de filtro, papel de tornesol azul e funil de boca larga. Para a execução dos reagentes utilizou-se água oxigenada a 20 volumes, ácido clorídrico, hexametáfosfato de sódio e água destilada. Na Figura 3.10 é possível observar os materiais utilizados para a realização deste ensaio:

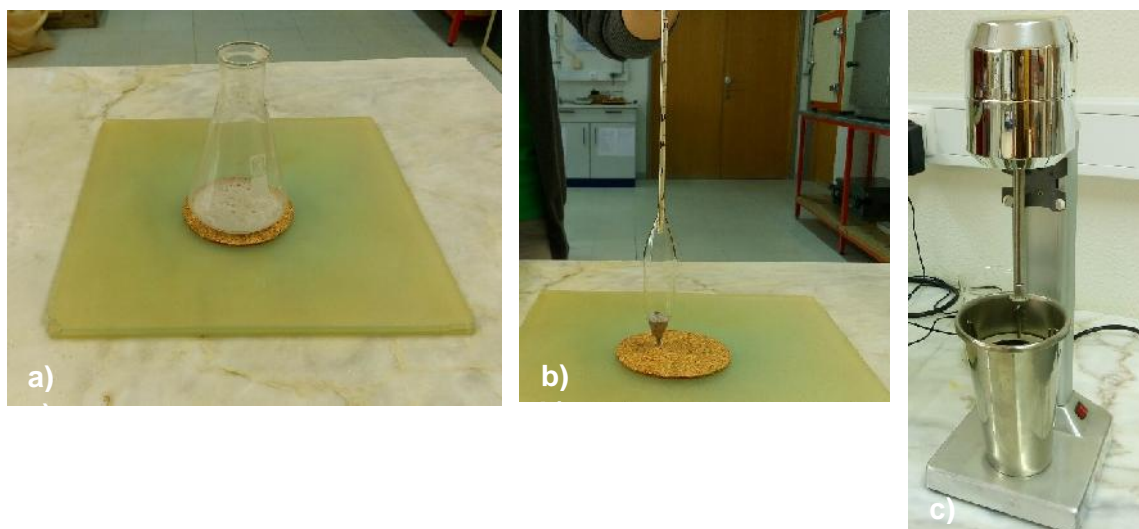


Fig. 3.10 – Materiais utilizados: a) Frasco com o antifloculante; b) Densímetro; c) Agitador elétrico

3.5.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este ensaio teve início com os processos de calibração do densímetro e do menisco e com a preparação do antifloculante, segundo as disposições regulamentadas por a norma em questão.

De seguida passou-se a peneiração do material através do peneiro de 2.0 mm, sendo que, o material que ficou retido neste peneiro voltou a ser peneirado, através da serie de peneiros com malha superior a 2.0 mm, determinando-se as massas das frações retidas em cada um dos peneiros.

Do material que passou no peneiro de 2.00 mm pesou-se 10 g e determinou-se o seu teor em água de acordo com a NP-84. Deste mesmo material voltou a pesar-se 110 g e para o solo do Litoral Algarvio, uma vez que se trata de um solo com baixo teor em matéria orgânica, colocou-se o mesmo num frasco de Erlenmeyer, para o solo da Serra Algarvia, tendo em conta que possui um teor em matéria orgânica superior a 2%, colocou-se, primeiramente, as 110 g do solo num frasco de Erlenmeyer e juntou-se 150 cm³ de água oxigenada, mexendo-se durante alguns minutos, deixando o frasco, coberto, repousar durante a noite. Passada a noite, aqueceu-se a mistura no frasco e, quando diminuiu a espuma, ferveu-se até que o volume da mistura fosse reduzido para 50 cm³, transferindo a mesma para uma cápsula, secando-se em estufa, e pesando-se, seguidamente, para a determinação da massa do solo, após este tratamento.

Posteriormente, o processo foi idêntico para os dois tipos de solo, aos quais se juntou, 110 cm³ da solução do antifloculante, aqueceu-se a mistura durante 10 minutos e, de seguida, transferiu-se a mistura para o recipiente do agitador, pondo-se em funcionamento o mesmo, durante 15 minutos.

Seguidamente, transferiu-se a suspensão para o peneiro de 0.075 mm e lavou-se o solo, através de um jato de água destilada. O material que ficou retido neste peneiro foi transferido para uma cápsula e colocado em estufa para secagem sendo, posteriormente, peneirado através dos peneiros de 0.850 mm, 0.425 mm, 0.250 mm, 0.106 mm e 0.075 mm, pesando-se, por fim, a fração retida em cada peneiro.

A suspensão que passou no peneiro de 0.075 mm foi então transferida para um provete, que se encheu com água destilada até 1000 cm³. De seguida, tapou-se a boca do provete, agitou-se o mesmo e colocou-se em cima da bancada para o início da contagem do tempo. Foi então colocado o densímetro na suspensão e leu-se o mesmo ao fim de 1, 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 e 2880 minutos, registando-se também a temperatura da suspensão, após cada leitura do densímetro. As figuras que se seguem representam as várias fases no ensaio, explicadas em cima:

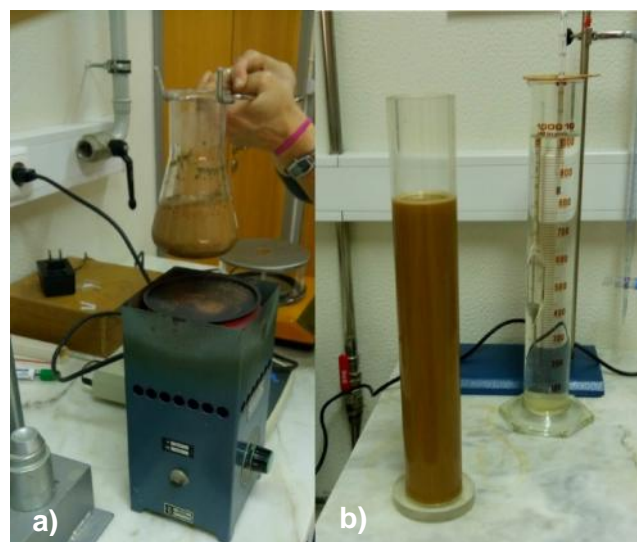


Fig. 3.11 – a) Aquecimento da mistura com o antifloculante; b) Provete com a suspensão passada no peneiro de 0.075 mm



Fig. 3.12 – a) Aquecimento da mistura com a água oxigenada; b) secagem do material que ficou retido no peneiro de 0.075 mm

3.5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados finais para a sedimentação são obtidos através da Equação 3.16, que indica a percentagem de partículas de diâmetro inferior a D , em relação à massa total da amostra:

$$ND = nD \times \frac{100 - N'_{10}}{100} \quad (3.16.)$$

em que, N'_{10} é a percentagem de material retido no peneiro de 2.00 mm e nD é dado pela seguinte expressão:

$$nD = \left(\frac{100000}{m_b} \times \frac{G}{G-1} \right) \times (L_c - 1) \quad (3.17.)$$

em que, G é a densidade das partículas, m_b é a massa do provete seco e L_c é a leitura do densímetro corrigida, dada pela seguinte expressão:

$$L_C = L_S + C_M - C_A + C_T \quad (3.18.)$$

sendo, L_s a leitura direta feita na parte superior do menisco, C_M a correção do menisco, C_A a correção do antifloculante e C_T a correção da temperatura.

sendo que D , referente ao diâmetro das partículas, é dado pela seguinte expressão:

$$D = K \sqrt{\frac{Z_s}{t}} \quad (3.19.)$$

em que, K é função da temperatura e da densidade das partículas, Z_s é a profundidade efetiva e t o intervalo de tempo desde o início da sedimentação até à leitura do densímetro.

3.5.3.1. Solos do Litoral Algarvio

Assim sendo, os resultados da análise granulométrica por sedimentação, são dados em anexo (anexo 13 e 14) e estão resumidos no Quadro 3.9:

Quadro 3.9 – Resultados do ensaio da sedimentação – Litoral Algarvio

Tempo (min)	Temperatura (°C)	n_D (%)	D (mm)	N_D (mm)
1	24.5	10.7	0.0550	10.4
2	24.5	9.9	0.0390	9.6
5	24.5	9.9	0.0247	9.6
15	24.0	9.7	0.0142	9.5
30	23.8	9.7	0.0101	9.4
60	23.2	9.5	0.0071	9.2
250	22.0	9.1	0.0035	8.8
1520	20.6	8.2	0.0014	8.0
2880	20.2	7.7	0.0010	7.5

3.5.3.2. Solos da Serra Algarvia

Os resultados obtidos para este solo encontram-se em anexo (anexo 15 e 16) e estão representados, resumidamente, no seguinte quadro:

Quadro 3.10 – Resultados do ensaio da sedimentação – Serra Algarvia

Tempo (min)	Temperatura (°C)	n_D (%)	D (mm)	N_D (mm)
1	21.4	35.3	0.0558	18.1
2	21.4	35.3	0.0395	18.1
5	21.4	31.9	0.0251	16.3
15	21.2	30.1	0.0146	15.4
30	21.2	26.6	0.0104	13.6
60	21.2	23.2	0.0074	11.9
250	21.2	18.0	0.0036	9.2
1520	20.5	10.7	0.0015	5.5
2880	21.0	9.3	0.0011	4.8

Feita a análise e a conclusão dos ensaios, para o Litoral algarvio e para a Serra Algarvia, traçou-se a curva granulométrica dos dois tipos de solo. Com base nas percentagens de areia, silte e argila, procedeu-se à classificação de ambos os solos, para três classificações distintas, nomeadamente as classificações S.R.O.A (Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário), Trilinear e F.A.O (Food and Agriculture Organization das Nações Unidas).

Na figura seguinte, pode-se observar as curvas granulométricas, referentes aos dois tipos de solo:

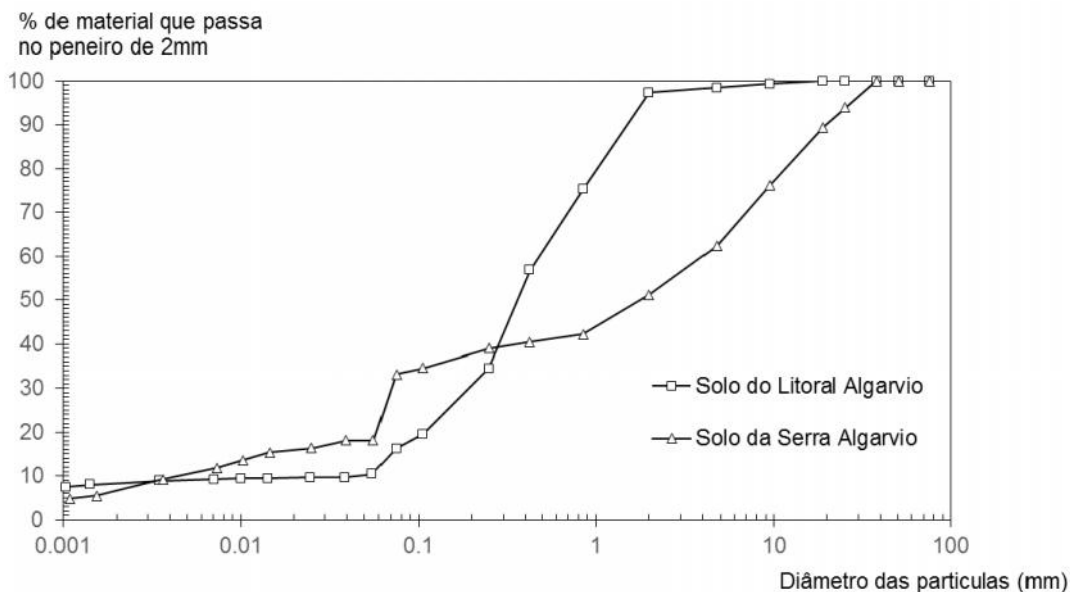


Fig. 3.13 – Curva granulométrica dos solos do Litoral Algarvio e da Serra Algarvia

Em seguida, são apresentados os ábacos obtidos, mencionados anteriormente, com as classificações texturais dos dois tipos de solo, tendo em conta as diferentes classificações, S.R.O.A, Trilinear e F.A.O:

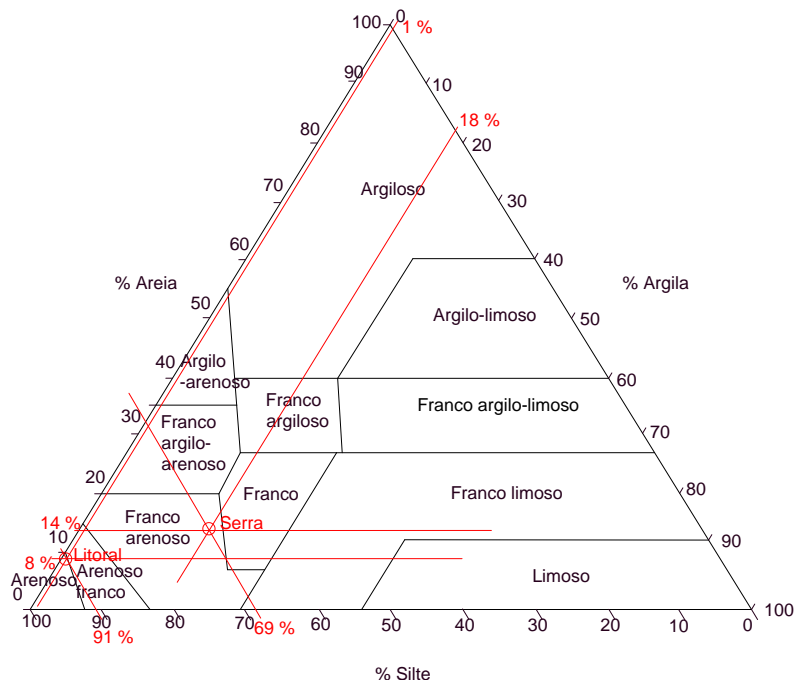


Fig. 3.14 – Classificação textural dos solos do Litoral e da Serra Algarvia, segundo S.R.O.A

Através da análise dos ábacos, para este tipo de classificação textural, tendo em conta as respetivas percentagens de areia, argila e limo, conclui-se que o solo do Litoral trata-se de um solo arenoso e que o solo da Serra trata-se de um solo franco arenoso.

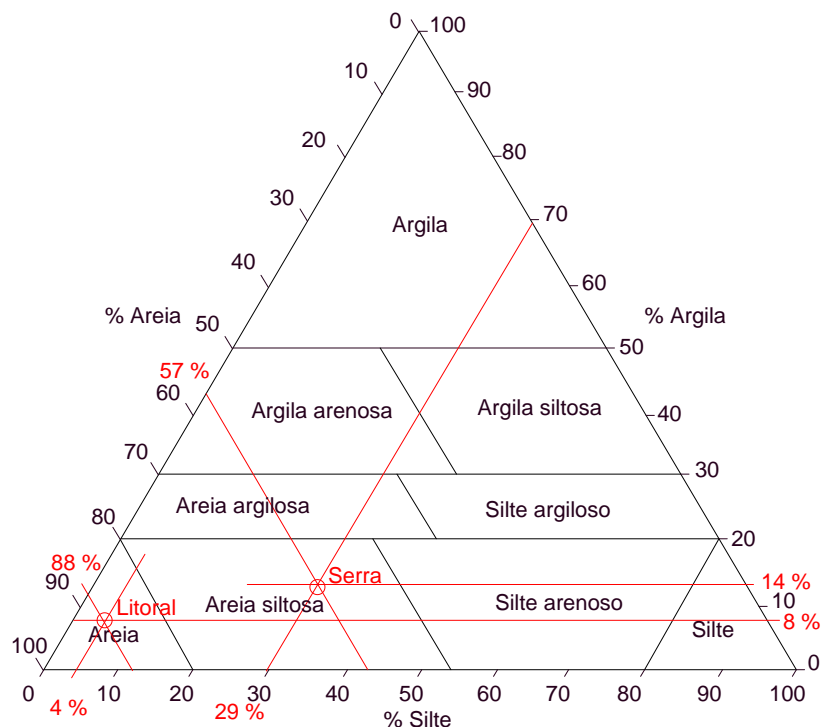


Fig. 3.15 – Classificação textural dos solos do Litoral e da Serra Algarvia, segundo Trilinear

Para esta classificação, através da análise do ábacos e tendo em conta as respetivas percentagens de areia, argila e silte conclui-se que o solo do Litoral trata-se de uma areia, tratando-se o solo da Serra, de uma areia siltosa.

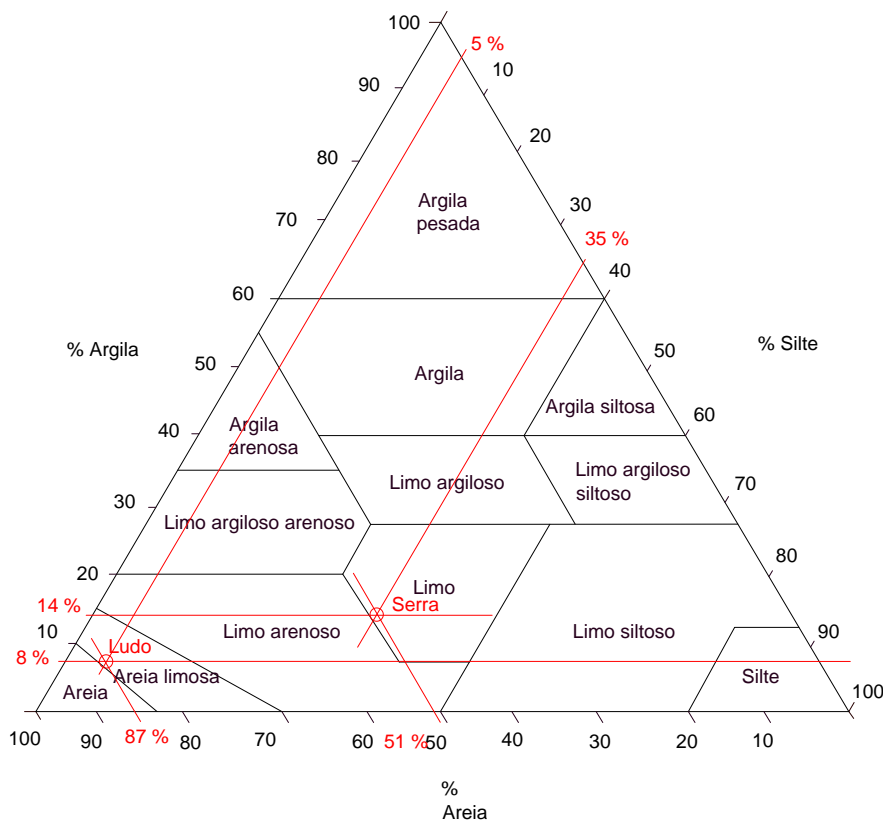


Fig. 3.16 – Classificação textural dos solos do Litoral e da Serra Algarvia, segundo F.A.O

Em relação a esta classificação e através da análise deste ábaco, tendo em conta as respetivas percentagens de areia, argila e limo, conclui-se que o solo do Litoral trata-se de uma areia limosa e que o solo da Serra trata-se de um limo.

Assim sendo, através de uma análise global às três classificações distintas, conclui-se que para cada uma delas, obtêm-se resultados ligeiramente diferentes, sendo que, tendo em consideração uma apreciação global e os resultados de todos os ensaios realizados para cada um dos solos, caracterizámos o solo do Litoral Algarvio como um solo Arenoso e o solo da Serra Algarvia como um solo Areno-Siltoso ou Franco Arenoso.

3.6. ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO

Este ensaio tem como principal objetivo a simulação de incêndio em laboratório sobre três amostras distintas (amostra B, amostra C e amostra D), com a finalidade de se obter a carga térmica nos solos durante todo o incêndio, em diferentes profundidades, através de um conjunto de termopares ligados a *data loggers*, colocados a 1.5, 3.0 e 4.5 cm de profundidade. A amostra A não foi sujeita ao efeito do incêndio.

3.6.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a execução deste ensaio foi utilizado material combustível retirado do mesmo local onde foram recolhidas as amostras de solo, tendo-se queimado quantidades diferentes de material combustível em cada uma das amostras B, C e D. Utilizaram-se também dois conjuntos de três termopares, cada um deles ligado a um *data logger* independente, com a função de registar os dados medidos pelos termopares.

3.6.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este ensaio foi realizado apenas para o solo do litoral algarvio, uma vez que, para o solo da serra algarvia, estes ensaios foram realizados por Lança *et al.* (2014).

Os ensaios nas três amostras do solo do litoral algarvio foram elaborado no dia 19/05/2015, tendo início com a simulação do incêndio na amostra B. A amostra B possuía 1 kg de material combustível, sendo que o início deste ensaio deu-se às 11 horas e 25 minutos, tendo sido registada a temperatura, pelos termopares colocados a 1.5 cm, 3.0 cm e 4.5 cm de profundidade, em dois lados distintos da mesma amostra durante o decorrer da experiência.

O ensaio na amostra C teve início às 12 horas, possuindo 2 kg de material combustível.

Por último, o ensaio D teve o seu começo às 12 horas e 55 minutos, contendo este 4 kg de material combustível.

A amostra A, não foi sujeita à simulação de incêndio, propositadamente, uma vez que constituirá a situação de referência em que o solo não é afetado pelo incêndio.

3.6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.6.3.1. Solos do Litoral Algarvio

As três amostras de solos sujeitas ao incêndio, com diferentes quantidades de material combustível, alcançaram valores distintos de temperatura durante diferentes intervalos de tempo.

Foi observado que a amostra D, com quatro vezes mais material combustível que a amostra B, obteve temperaturas maiores, atingindo os 308.5°C para a profundidade de 1.5 cm, sendo que a amostra B atingiu os 254.5°C, para a mesma profundidade.

Para a profundidade de 3.0 cm, verificámos que o solo D atingiu uma temperatura de 227.5°C, ao contrário do solo B que, para a mesma profundidade, atingiu uma temperatura, muito inferior, de 76.0°C.

Em relação à profundidade de 4.5 cm, observámos que as temperaturas nas duas amostras diminuem significativamente com o aumento da profundidade, atingindo a amostra D uma temperatura de 139.5°C e a amostra B um temperatura de apenas 38.5°C.

Verificou-se assim que, através dos valores de temperatura registados pelos termopares para cada profundidade, quanto menor é a profundidade do solo sujeito ao incêndio, maior é a temperatura que este possui, diminuindo, significativamente, o valor da temperatura, à medida que a profundidade deste aumenta.

Concluimos também que, o facto da amostra D possuir quatro vezes mais material combustível que a B influencia consideravelmente o intervalo de tempo durante o qual o solo está sujeito a temperaturas elevadas.

Na figura que se segue é possível observar as três amostras sujeitas ao ensaio de simulação do incêndio:



Fig.3.17 – Simulação do incêndio nas amostras B, C e D

Na Figura 3.18 é possível observar as temperaturas alcançadas no solo, ao longo da combustão, na amostra B, com o valor mínimo de material combustível, e na amostra D com o valor máximo de material combustível. Na amostra C não foi registado o valor da temperatura.

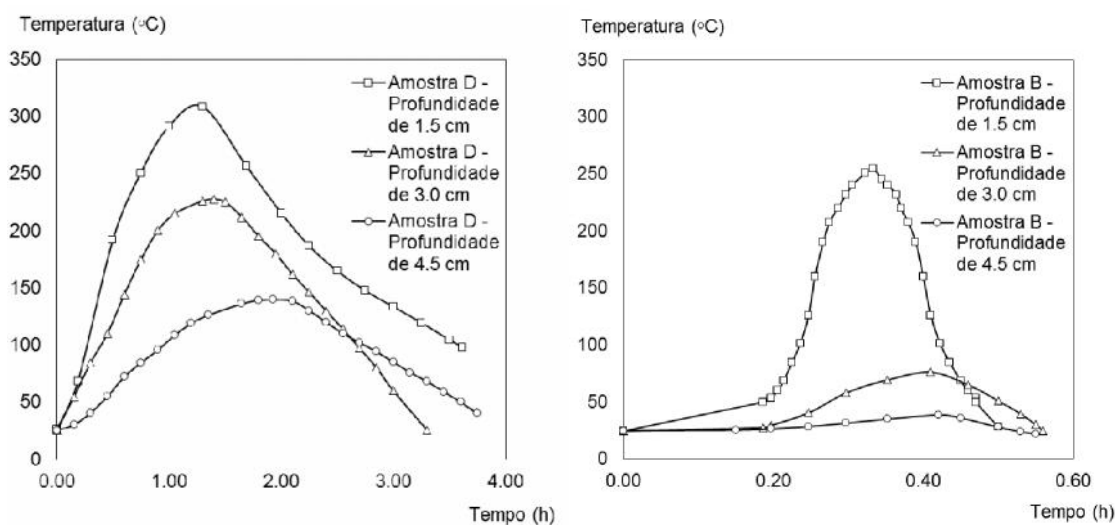


Fig.3.18 – Temperaturas alcançadas no a) ensaio B e b) no ensaio D

3.7. ENSAIO DE INFILTRAÇÃO

Este ensaio foi realizado sobre um conjunto de amostras retiradas do Litoral Algarvio, mais precisamente no Ludo, e tem como principal objetivo a medição da taxa de infiltração da água no solo, em solos idênticos, mas tendo sido sujeitos a incêndios com diferentes quantidades de material combustível. Com este conjunto de ensaios pretende-se obter dados que permitam fazer uma análise quantitativa sobre o efeito dos incêndios na alteração das propriedades hidráulicas dos solos.

3.7.1. EQUIPAMENTOS E UTENSÍLIOS UTILIZADOS

Para a execução deste ensaio, recorreu-se à utilização de um infiltrómetro de duplo anel, o anel interior com 20 cm de diâmetro e o anel exterior com 30 cm de diâmetro. Ambos os anéis foram cravados na amostra de solo, a uma profundidade de, aproximadamente, 5 cm. Utilizaram-se válvulas de nível, colocadas, previamente, em cada um dos anéis e dois reservatórios com água. Estes equipamentos foram utilizados da mesma forma, em cada uma dos ensaios realizados sobre as diferentes amostras.

3.7.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este ensaio foi realizado sobre um conjunto de amostras de solo não perturbado, retirado do litoral algarvio, sendo as amostras colocadas em caixas metálicas com dimensões de 50x50x25 cm.

Este ensaio foi realizado, após a concretização de todos os ensaios, referidos anteriormente, incluindo o ensaio de simulação de incêndio, obtendo-se assim diferentes quantidades de material combustível, M , em cada uma das três amostras.

Para a realização deste ensaio, recorreu-se primeiramente, à cravação dos anéis metálicos na amostra, seguindo-se, a colocação das válvulas de nível no anel interior e no anel exterior e, após o enchimento dos reservatórios com água, deu-se início ao ensaio, efetuando-se as medições do volume de água no reservatório, que alimentava o anel interior. Estas medições foram realizadas a cada minuto, durante 20 minutos, a cada 2 minutos, durante 14 minutos, a cada 5 minutos, durante 25 minutos e a cada 10 minutos durante o resto do ensaio.

Durante os ensaios, foi mantida uma carga hidráulica constante, sobre a superfície do solo, de 3 cm, através das válvulas de nível. Os ensaios tiveram uma duração de, aproximadamente, três horas, sendo este o instante a partir do qual a taxa de infiltração observada permaneceu constante.

3.7.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.7.3.1. Solos do Litoral Algarvio

Através da execução deste ensaio obtivemos as curvas de infiltração acumuladas, I , em função de t , que serão apresentadas no capítulo 4.

Com base na Equação de Philips, $I = Kt + St^{0.5}$, obteve-se a sorvidade, S , e a condutividade hidráulica, K_s , através de regressão dos valores de infiltração acumulada, obtidos por via experimental.

O quadro 3.11 mostra os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade, nas três amostras sujeitas a incêndio simulado em laboratório com diferentes quantidades de material combustível e também na amostra que não foi sujeita a incêndio.

Quadro 3.11 – Valores da quantidade de material combustível, M , da condutividade hidráulica, k_s , e da sorvidade, S

Provete	M (kg)	k_s (mm h ⁻¹)	S (mm h ^{-0.5})
A	0	24.02	3.44
B	1	15.36	2.85
C	2	13.35	2.01
D	4	5.11	0.5

4. MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SOLOS DEVIDO AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Durante os incêndios florestais os solos sofrem alterações das suas propriedades devido à exposição a temperaturas muito elevadas, ao depósito de cinzas, e aos compostos voláteis que penetram nos interstícios. O solo pós-incêndio tende a apresentar um incremento da repelência à água e conseqüentemente uma diminuição da capacidade de infiltração. Tal facto contribui para o aumento do potencial de escoamento superficial e conseqüente inundação e transporte de sedimentos à escala da bacia hidrográfica.

Com vista a caracterizar a modificação das propriedades hidráulicas dos solos devido aos incêndios florestais, foi realizada uma campanha experimental em que se recolheram quatro amostras não perturbadas de solo. Após a sua caracterização física, apresentada no Capítulo 3, foram realizados ensaios de simulação do incêndio em laboratório sobre três dessas amostras, com diferentes quantidades de material combustível, levando a diferentes intensidades de combustão e diferentes tempos de exposição a temperaturas elevadas e a diferentes quantidade de cinzas depositadas. Uma amostra não foi sujeita a condições de incêndio e foi utilizada para caracterizar a situação de referência pré-incêndio.

Na análise que se apresenta no presente capítulo também são utilizados dados dos ensaios idênticos realizados em solos da serra algarvia por Lança *et al.* (2014).

Após a simulação de incêndio em laboratório, foram realizados ensaios de infiltração com infiltrómetro de duplo anel, de modo a determinar a condutividade hidráulica quase saturada, K_r , sorvidade, S , porosidade efetiva, μ , e potencial matricial do solo, nas diferentes amostras através do ajuste dos modelos de Philips e de Green-Ampt às curvas de infiltração observadas.

É de referir que os valores absolutos de condutividade hidráulica e de sorvidade obtidos poderão divergir dos valores que seriam obtidos num ensaio de campo sob as mesmas condições de solo e de material combustível, essencialmente devido às diferentes condições de drenagem do confinamento da amostra no campo e em laboratório. Contudo, não foi possível obter autorização para realizar ensaios de campo durante o verão, devido ao risco elevado de incêndio. Estes mesmos ensaios realizados no inverno ou na meia estação iriam conduzir a resultados diferentes, pois a variação do teor em água do solo altera a sua condutividade térmica e a forma como este responde ao calor, por outro lado o ciclo vegetativo das plantas e o teor de água que estas contêm também são diferentes, conduzindo a compostos voláteis e a quantidade e qualidade diferentes da cinza.

Deste modo, a análise realizada no âmbito deste capítulo assume que os valores absolutos de condutividade hidráulica e de sorvidade poderão ser diferentes devido às condições de

drenagem do confinamento das amostras, mas que a variação destas propriedades, face aos valores obtidos em amostra nas mesmas condições de drenagem, mas não sujeitas ao fogo, é válido.

Os resultados obtidos permitem quantificar a variação nas propriedades hidráulicas em solos ardidos, o que se torna relevante na aferição de modelos hidrológicos aplicados a bacias hidrográficas, em cenário pós-incêndio.

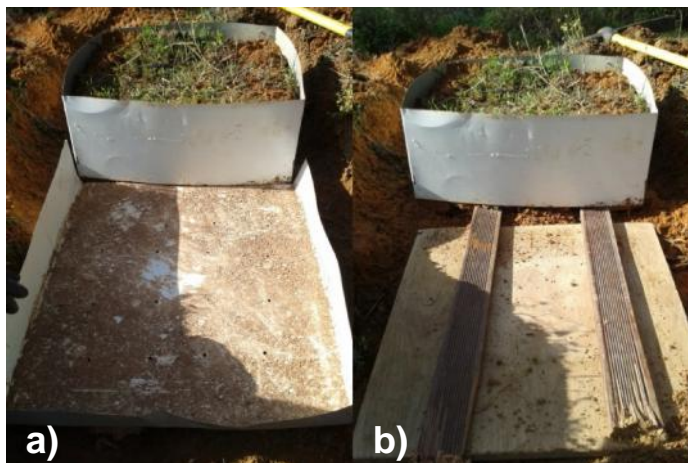
4.2. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS PARA OS SOLOS DO LITORAL ALGARVIO

No que respeita aos ensaios físicos do solo, passou-se primeiramente, à recolha de várias amostras não perturbadas de solo no litoral Algarvio, Ludo (coordenadas: 37° 2'15.23"N; 7°58'43.60"W), que foram, posteriormente, colocadas em caixas metálicas com dimensão 50x50x25 cm.

As quatro amostras de solo foram cortadas lateralmente e confinadas de seguida, de modo a que o solo não fosse perturbado. Posteriormente, cortou-se a base da amostra através da cravação horizontal de estacas de madeira. Finalmente colocou-se a base da caixa, construída em chapa metálica perfurada, entre as estacas de madeira e a amostra, de modo a permitir o seu transporte para o laboratório.



Fig.4.1 – Corte e confinamento lateral da amostra



Figuras 4.2 – a) Corte e cravação das estacas; b) Colocação da base da caixa

Conforme apresentado no Capítulo 3, determinou-se, no laboratório de Geotécnia, do Departamento de Engenharia Civil, do Instituto Superior de Engenharia, da Universidade do Algarve, a granulometria do solo, através do ensaio granulométrico por peneiração, verificando-se que este é constituído por 91% de areia, 8% de argila e 1% de limo. Determinou-se também a percentagem de matéria orgânica do solo, sobre 12 amostras, antes da combustão, obtendo-se uma média de 16.42 gKg^{-1} , o que representa 1.64% em massa. A porosidade foi também determinada para 4 amostras, antes da combustão, sendo que 2 delas foram retiradas, no mesmo local, mas a três metros de distância, obtendo-se uma porosidade média de 20% para duas delas e 39% para as outras duas, o que nos faz concluir, desde já, que o mesmo solo, distanciado de apenas de poucos metros, pode possuir características e porosidades distintas. Para a porosidade volumétrica, $\theta = V_v/V$ (volume de vazios sobre o volume total da amostra) obtiveram-se valores médios de 30% para duas das amostras e 48% para as restantes duas amostras. Foi também determinada a densidade das partículas sólidas do solo, antes da combustão, tendo-se obtido um valor médio de 2.58.

Os ensaios para a determinação da condutividade hidráulica e sorvidade do solo, foram realizados, no laboratório de Hidráulica da mesma instituição, sobre 4 amostras onde em 3 delas a simulação de incêndio foi realizada com diferentes massas de material combustível, M , sendo esta constituído, na sua maioria, por pinheiro e caruma. A amostra A não foi sujeita a incêndio nem foi colocado qualquer tipo de material combustível, enquanto as restantes amostras foram sujeitas ao incêndio e com as seguintes massas de material combustível: Amostra B, $M = 1\text{kg}$, amostra C, $M = 2\text{kg}$ e amostra D, $M=4\text{kg}$, sendo M a massa total de material combustível sobre a amostra de solo.

O Quadro 4.1 apresenta as variáveis características dos ensaios:

Quadro 4.1 – Variáveis características dos ensaios de simulação de incêndio em laboratório sobre o solo do litoral Algarvio

Amostra	A	B	C	D
Material combustível total, M (kg)	0	1	2	4
Material combustível total, m (kgm ⁻²)	0	4	8	16
Teor em água médio no solo, após combustão (%)	0.80	0.55	0.65	0.38
Duração da combustão (min)	--	5	20	25
Temperatura máxima durante a combustão (°C)	--	254.5	--	308.5

Para a amostra C, não foi possível realizar a medição da temperatura, durante a combustão.

Relativamente à medição da taxa de infiltração recorreu-se ao ensaio com infiltrómetro de duplo anel, possuindo os respetivos anéis um diâmetro interior de 20 cm e um diâmetro exterior de 30 cm, sendo que os mesmos foram cravados na amostra, até uma profundidade de 5 cm. Durante a realização do ensaio foi mantida uma carga hidráulica constante, com recurso a duas válvulas de nível, uma no anel interior e outra no espaço entre o anel exterior e o anel interior, conforme mostrado na Figura 4.4 e Figura 4.5.

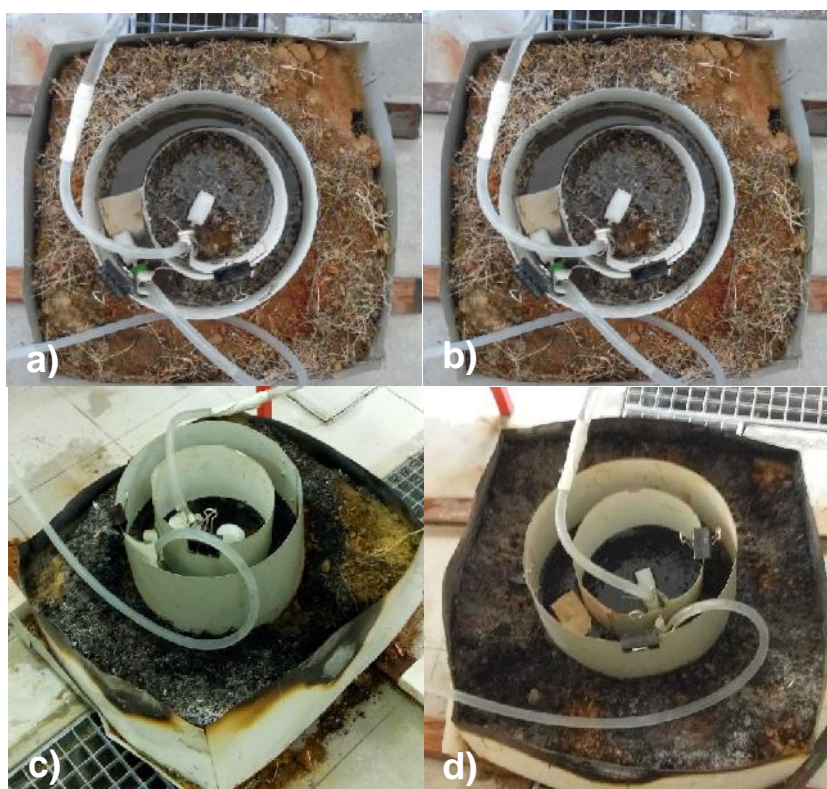


Fig.4.3 – Ensaio com recurso a infiltrómetro de duplo anel: a) Amostra A, b) amostra B, c) amostra C e d) amostra D

Foram também efetuadas medições do volume de água no reservatório que alimentava o anel interior (Figura 4.4), a cada minuto, durante 20 minutos, a cada 2 minutos, durante 14 minutos, a cada 5 minutos, durante 25 minutos e a cada 10 minutos durante o resto do ensaio. Os ensaios tiveram durações aproximadas de três horas, sendo que no final do ensaio a taxa de infiltração permanecia aproximadamente constante.

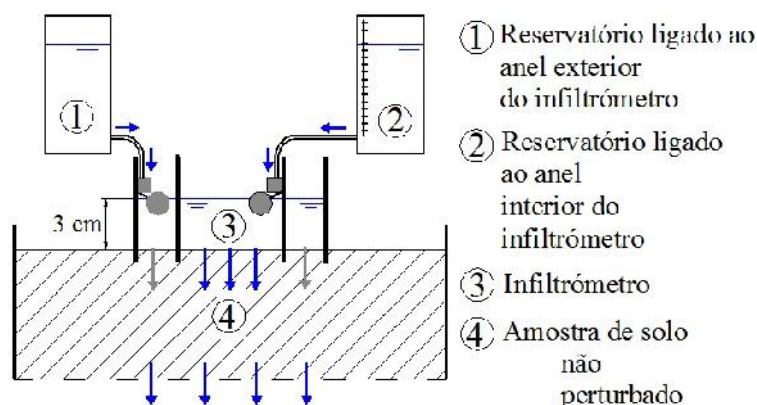


Fig.4.4 - Esquema hidráulico dos ensaios realizados com recurso a infiltrómetro de duplo anel, adaptado de Lança, *et al* (2014)

4.3. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS E PROCEDIMENTOS PARA OS SOLOS DA SERRA ALGARVIA

Os ensaios físicos referentes ao solo da serra foram realizados por Lança, *et al*, sendo que o procedimento de recolha das amostras, realizado nos solos do litoral Algarvio, seguiu o mesmo protocolo.

As amostras relativas a este ensaio foram retiradas na Serra do Caldeirão, num local com as coordenadas WGS84: 37°12'0.6''N; 7°55'32.5''W). A granulometria do solo, determinada através do ensaio granulométrico por peneiração, consiste em 49% de cascalho anguloso, 31% de partículas finas e 20% de areia. A matéria orgânica do solo, determinada sobre 6 amostras, antes da combustão, apresenta um valor médio de 26.51 gKg⁻¹, o que representa 2.65% da massa de solo. A porosidade foi determinada sobre 4 amostras, antes da combustão, obtendo-se uma porosidade média de 45%. A porosidade volumétrica apresenta um valor médio de 55%.

Foi também determinada a densidade das partículas sólidas do solo, antes da combustão, tendo-se obtido um valor médio de 2.53.

O procedimento experimental adotado por Lança *et al.* (2014) para a determinação da condutividade hidráulica e sorvidade do solo, foi idêntico ao que se descreveu para os solos do litoral algarvio. As variáveis características, obtidas por Lança, *et al.* (2014) são apresentadas no Quadro 4.2:

Quadro 4.2 – Variáveis características dos ensaios da serra algarvia, Lança *et al.* (2014)

Amostra	A	B	C	D
Material combustível total, M (kg)	0	1	2	4
Material combustível total, m (kgm ⁻²)	0	4	8	16
Teor em água médio no solo, após combustão (%)	2.49	2.02	1.73	1.55
Duração da combustão (min)	--	19	16	18
Temperatura máxima durante a combustão (°C)	--	>300	>300	>300

Para a medição da taxa de infiltração foi utilizado um infiltrómetro de duplo anel, sendo o seu procedimento idêntico ao descrito nos ensaios aos solos do litoral algarvio.

Ao longo destes ensaios, foram realizadas medições do volume de água no reservatório que alimentava o anel interior, a cada minuto, durante uma hora, e a cada cinco minutos, durante o resto do ensaio, detendo estes ensaios durações aproximadas de quatro horas.

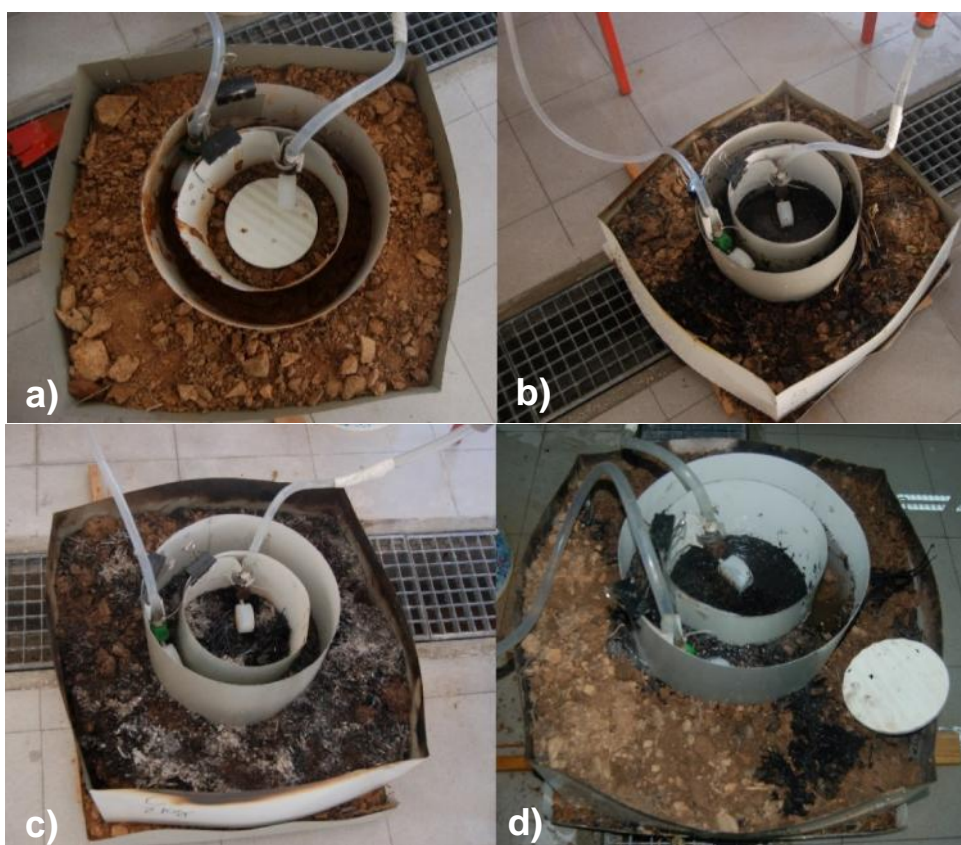


Figura 4.5 – Ensaio com recurso a infiltrómetro de duplo anel em Solos da Serra Algarvia: a) Amostra A, b) amostra B, c) amostra C e d) amostra D, Lança *et al.* (2014)

4.4. RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS NOS SOLOS DO LITORAL ALGARVIO

Considerando o modelo de Philips (Equação 4.1) e através do ajuste por regressão polinomial de segunda ordem às curvas de infiltração acumulada expressa em função de $t^{0.5}$, Figura 4.7, obtêm-se diretamente os valores da condutividade hidráulica, k_s e da sorvidade, S .

$$I = k_s \times t + S \times t^{0.5} \quad (4.1)$$

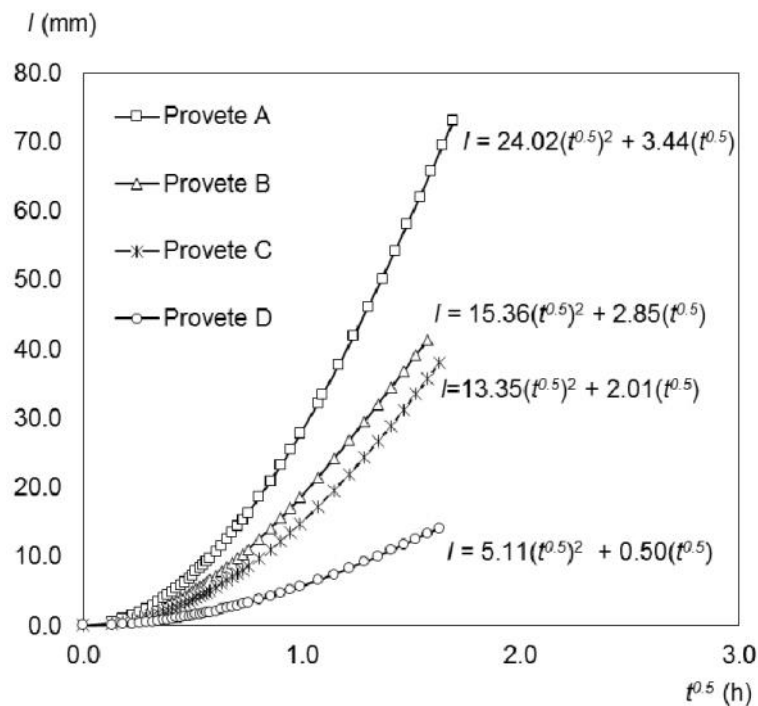


Fig.4.6 – Infiltração acumulada, I , em função da raiz quadrada do tempo, $t^{0.5}$, para os ensaios do litoral algarvio

Os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade são apresentados no Quadro 4.3, bem como os fatores de correção da condutividade hidráulica, K_{k_s} , e da sorvidade, K_S , em função do material combustível sobre a amostra antes do incêndio, M , por unidade de área, $m = M/A$, que foram obtidos de acordo com $K_{k_s} = K_{S(m=x)}/K_{S(m=0)}$ e $K_S = S_{(m=x)}/S_{(m=0)}$, em que x representa um determinado valor de m . A aplicação destes fatores permite corrigir os valores de referência da condutividade hidráulica e da sorvidade, dos solos não ardidos, para solos ardidos, em função da biomassa por unidade de área antes do incêndio ocorrer, m .

Quadro 4.3 – Valores da condutividade hidráulica, k_s , sorvidade, S , e respetivos fatores, K_{ks} e K_S , para os solos do Litoral Algarvio

Provetete	m (kg m ⁻²)	k_s (mm h ⁻¹)	S (mm h ^{-0,5})	K_{ks}	K_S
A	0	24.02	3.44	1.00	1.00
B	4	15.36	2.85	0.64	0.83
C	8	13.35	2.01	0.56	0.59
D	16	5.11	0.5	0.21	0.15

Os resultados obtidos no laboratório, para a condutividade hidráulica e para a sorvidade, podem divergir dos resultados que obteríamos, caso o ensaio fosse realizado em campo, devido, essencialmente, à diferença nas condições de drenagem da amostra entre o ensaio em Laboratório e o ensaio em campo; contudo, os fatores K_{ks} e K_S , obtidos pelo rácio entre o respetivo ensaio e o ensaio de referência, amostra A e realizados com as mesmas condições de drenagem da amostra, traduzem, a variação de k_s e S , em função de m .

Posteriormente foi utilizado o modelo de Green-Ampt, Equação 4.2, para obter o potencial matricial do solo, ψ , atendendo a que a condutividade hidráulica, k_s , foi determinada pelo ajuste do modelo de Philips aos dados experimentais e a porosidade, θ , foi obtida por ensaio laboratorial, próprio para o efeito:

$$I(t) = k_s t + \psi \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{I(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \quad (4.2)$$

O Quadro 4.4 apresenta os valores de infiltração, $I(t)$, obtidos através da Equação 4.1, os valores de ψ , calculados através da Equação 4.2, tendo em conta que os valores de K_S , e de S foram obtidos em laboratório, os valores de θ determinados no laboratório de geotecnia, encontrando-se explicados no capítulo 3 do presente trabalho e os resultados de $I(t)$, obtidos através da resolução numérica da Equação 4.2, bem como os respetivos fatores de correção, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} .

Assim sendo, tendo em conta que as variáveis K_S , θ e ψ , são conhecidas, passou-se ao cálculo, através de um processo iterativo, dos valores da infiltração $I(t)$, pelo método de Green-Ampt, Equação 4.2.

Quadro 4.4 – Resultados de $l(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete A, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$l(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K_{\Delta\theta}$	ψ (mm)	K_{ψ}
0.53	15.23					
0.90	24.88					
1.70	45.32	1.05	0.31	-	3.43	-
2.03	53.66					
2.87	74.77					

Quadro 4.5 – Resultados de $l(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete B, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$l(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K_{\Delta\theta}$	ψ (mm)	K_{ψ}
0.53	10.22					
0.90	16.53					
1.65	29.00	0.91	0.29	0.94	3.17	1.05
2.15	37.20					
2.48	42.58					

Quadro 4.6 – Resultados de $l(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete C, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$l(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K_{\Delta\theta}$	ψ (mm)	K_{ψ}
0.53	8.54					
0.93	14.36					
1.55	23.21	0.63	0.49	1.58	1.28	0.43
2.38	34.89					
2.88	41.88					

Quadro 4.7 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K\Delta\theta$ e $K\psi$, para o provete D, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$I(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K\Delta\theta$	ψ (mm)	$K\psi$
0.53	3.07					
0.90	5.07					
1.65	9.07	0.13	0.47	1.52	0.28	0.09
2.32	12.62					
2.65	14.36					

A figura que se segue mostra os valores de K_{KS} e K_S obtidos, em função da respetiva massa, bem como as respetivas equações que traduzem esses valores.

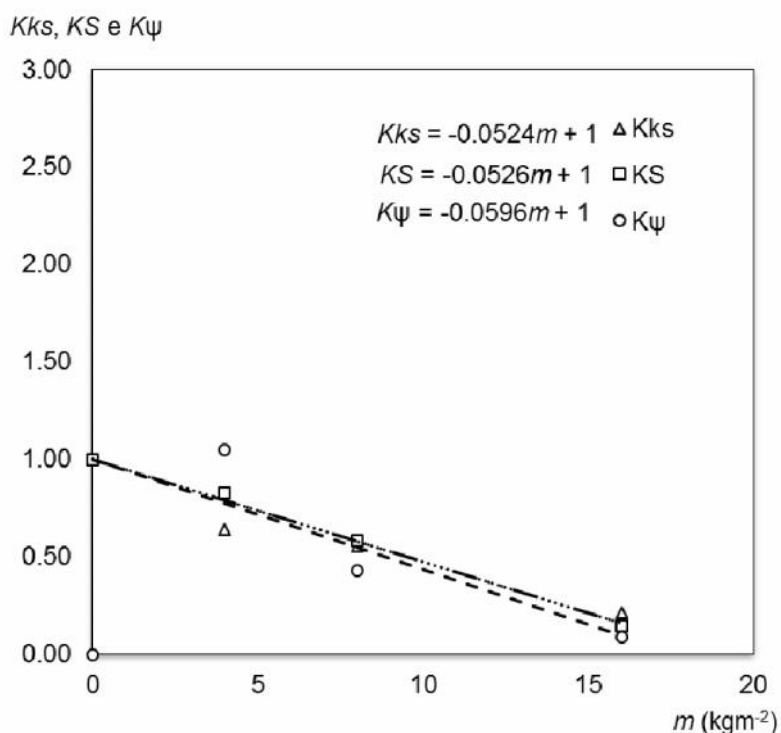


Fig.4.7 – Valores de K_{KS} e K_S em função da respetiva massa e respetivas equações, para os ensaios do litoral algarvio

Através da observação dos resultados anteriores é possível verificar que os valores de k_s , θ e ψ tendem a diminuir com a massa de material combustível, m . Este resultado traduz que os solos de textura arenosa franca do litoral Algarvio, após um incêndio, apresentam menor capacidade para reter água e menor aptidão para deixar a água deslocar-se no seu interior.

É também possível observar o efeito de m sobre k_s , S e ψ , verificando-se que para o solo de textura arenosa franca os valores destas variáveis tendem a diminuir com o aumento da intensidade do incêndio. Também são obtidas por regressão equações para os respetivos fatores de correção em função da quantidade de material combustível, que em condições de campo se traduz pela biomassa acima do solo.

De seguida, apresenta-se na Figura 4.9 a infiltração acumulada, em função do tempo, obtida pela aplicação do modelo de Green-Ampt. Verifica-se que o modelo descreve o fenómeno com um erro inferior a 25%, face aos valores observados após 2.5 horas, o que prova a validade dos parâmetros aferidos por retro análise e a adequação do modelo de Green-Ampt a condições pós-incêndio.

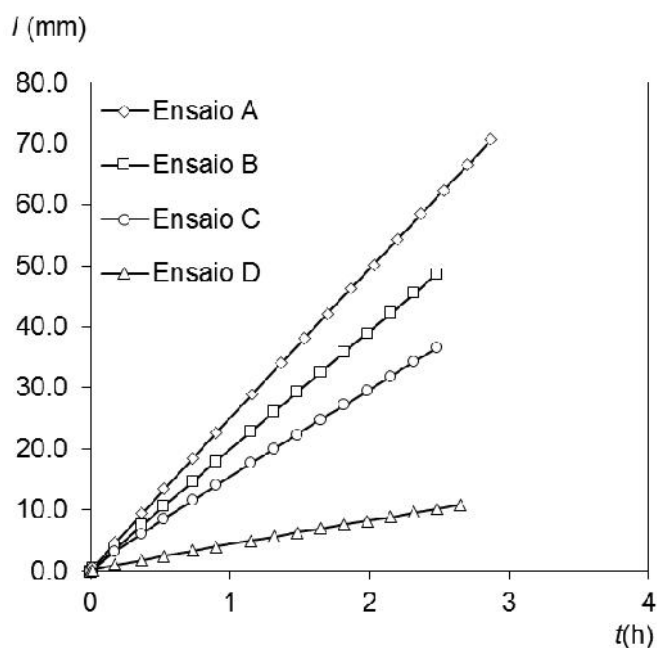


Fig.4.8 – Infiltração acumulada, I , em função do tempo, t , para os ensaios do litoral algarvio

Através da observação da figura anterior e, tendo em conta o método de Green-Ampt, é possível observar que nos solos estudados de textura arenosa franca, a taxa de infiltração é aproximadamente constante no tempo mas diminui consideravelmente nos ensaios em que a quantidade de material combustível foi maior. Este efeito leva-nos a concluir que a exposição ao calor, a presença de cinzas e outros compostos voláteis têm um grande impacto na capacidade de infiltração do solo.

4.5. RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS NOS SOLOS DA SERRA ALGARVIA

Apresentam-se na Figura 4.10 as curvas de infiltração acumuladas, I , em função da raiz quadrada do tempo, $t^{0.5}$, obtidas nos ensaios laboratoriais de infiltração, realizados por Lança *et al.* (2014):

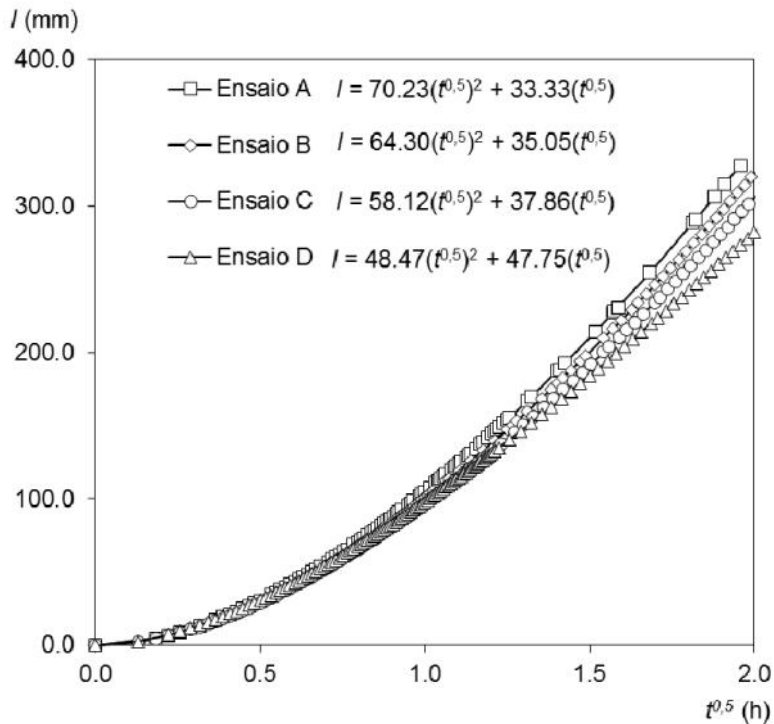


Fig.4.9 – Infiltração acumulada, I , em função da raiz quadrada do tempo, $t^{0.5}$, para os ensaios da serra algarvia

Da regressão polinomial de segunda ordem, das curvas da figura anterior, foram obtidos os valores da sorvidade, S , e da condutividade hidráulica, k_s .

Segundo Lança *et al* (2014), o aumento do material combustível, dá origem ao aumento da camada de cinzas no solo e, por consequente, a uma diminuição da condutividade hidráulica e aumento da sorvidade, relacionada com a diminuição do teor em água no solo, devido às elevadas temperaturas que são atingidas pelo mesmo, durante a combustão.

Seguidamente, são apresentados no Quadro 4.8 os resultados obtidos por Lança *et al* (2014), para os parâmetros da condutividade hidráulica e da sorvidade, bem como os fatores da condutividade hidráulica, Kk_s , e da sorvidade, Ks , que são função do material combustível, M , por unidade de área, tal como foi elucidado, anteriormente:

Quadro 4.8 – Valores da condutividade hidráulica, k_s , sorvidade, S , e respetivos fatores, Kk_s e Ks , para a serra algarvia, Lança *et al*. (2014)

Provete	m (kg m^{-2})	k_s (mm h^{-1})	S ($\text{mm h}^{-0.5}$)	Kk_s	KS
A	0	70.23	33.33	1.00	1.00
B	4	64.30	35.05	0.92	1.05
C	8	58.12	37.86	0.83	1.14
D	16	48.47	47.75	0.69	1.43

Seguindo uma metodologia idêntica à descrita para os solos do litoral, tendo em conta a equação de Green-Ampt, obtêm-se os valores de ψ , bem como, os respetivos fatores K_{ψ} , para cada um dos provetes:

Quadro 4.9 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete A, para os solos da serra algarvia

t (h)	$I(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K_{\Delta\theta}$	ψ (mm)	K_{ψ}
0.317	41.03					
0.50	58.68					
1.00	103.56	17.95	0.60	-	29.88	-
2.00	187.60					
4.00	347.58					

Quadro 4.10 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete B, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$I(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K_{\Delta\theta}$	ψ (mm)	K_{ψ}
0.317	40.12					
0.50	56.93					
1.00	99.35	20.30	0.52	0.87	38.81	1.31
2.00	178.17					
4.00	327.30					

Quadro 4.11 – Resultados de $I(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K_{\Delta\theta}$ e K_{ψ} , para o provete C, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$I(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K_{\Delta\theta}$	ψ (mm)	K_{ψ}
0.317	39.74					
0.50	55.83					
1.00	95.98	24.19	0.50	0.83	47.97	1.62
2.00	169.78					
4.00	308.20					

Quadro 4.12 – Resultados de $l(t)$, $\psi\Delta\theta$, $\Delta\theta$, ψ e respetivos fatores, $K\Delta\theta$ e $K\psi$, para o provete D, para os solos do litoral algarvio

t (h)	$l(t)$ (mm)	$\psi\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$K\Delta\theta$	ψ (mm)	$K\psi$
0.317	42.25	—	—	—	—	—
0.50	58.00	—	—	—	—	—
1.00	96.22	39.16	0.47	0.78	82.90	2.83
2.00	164.47	—	—	—	—	—
4.00	289.38	—	—	—	—	—

Os valores de ψ foram calculados em laboratório, encontrando-se explicados no capítulo 3 do presente trabalho.

A Figura 4.11 mostra os valores de K_{KS} e K_S , em função da respetiva massa, bem como as respetivas equações que traduzem esses valores:

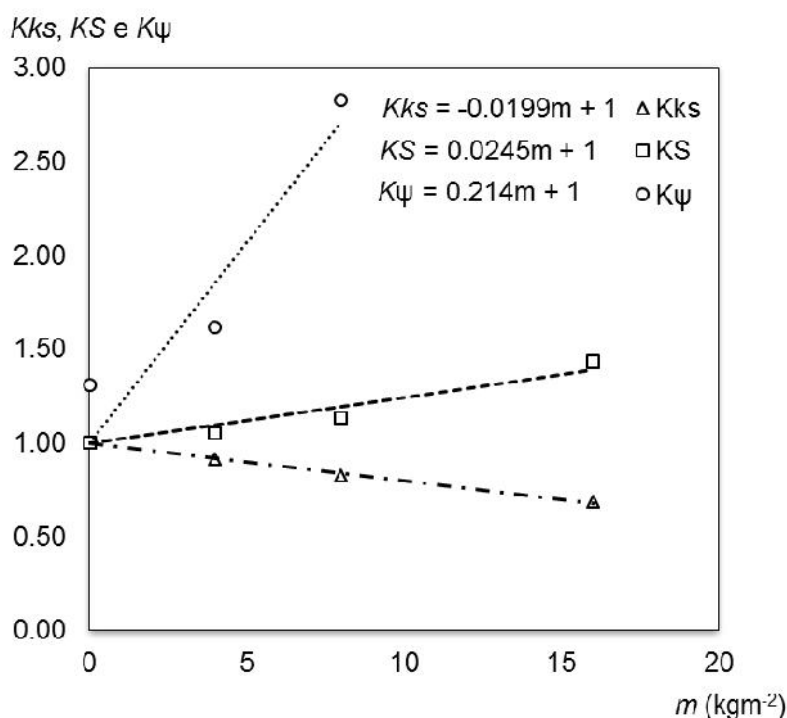


Fig.4.10 – Valores de K_{KS} e K_S em função da respetiva massa e respetivas equações, para os ensaios da serra algarvia

Através da análise da Figura 4.10 conclui-se que a sorvidade e o potencial matricial aumentam e a condutividade hidráulica diminui, em função do material combustível por unidade de área e da conseqüente intensidade do incêndio. Estes resultados indicam que no solo de textura franco argilo-arenoso da serra algarvia após sujeitos a condições de incêndio tendem a

aumentar a capacidade de retenção de água mas reduzem a aptidão para a movimentação de água no seu interior.

Seguidamente, apresenta-se o gráfico que traduz a infiltração acumulada, em função do tempo, obtida pela aplicação do modelo de Green-Ampt. Verifica-se que as curvas de infiltração modeladas pela aplicação da equação Green-Ampt seguem as curvas obtidas em ensaio experimental com um erro sempre inferior a 3.53%, face aos valores observados após 2.0 horas, o que prova a validade dos parâmetros aferidos por retro análise e a adequação do modelo de Green-Ampt a condições pós-incêndio.

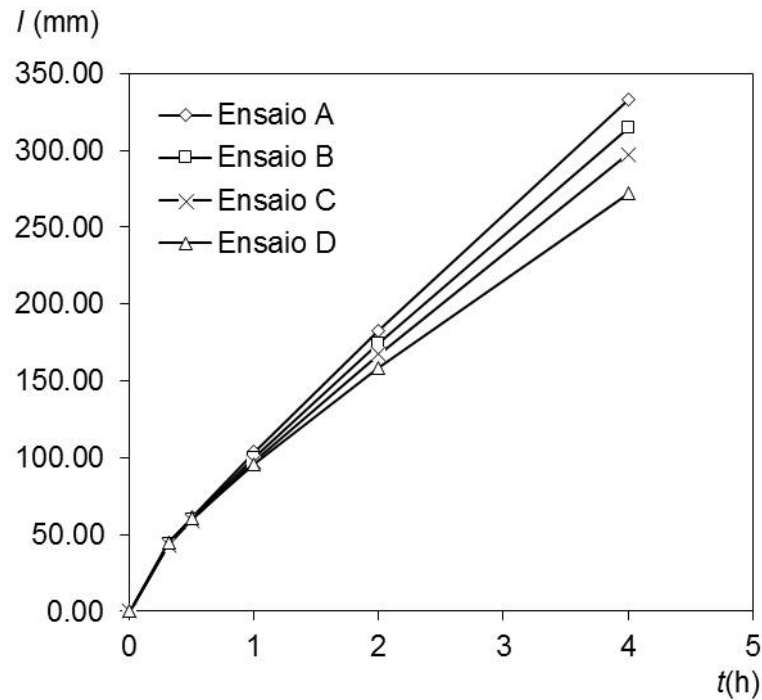


Fig.4.11 – Infiltração acumulada, I , em função do tempo, t , para os ensaios da serra algarvia

5. AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS INCÊNDIOS NO LITORAL ALGARVIO - AVALIAÇÃO BASEADA NA CURVA NÚMERO

5.1. INTRODUÇÃO

O processo de infiltração pode ser representado através de equações físicas da infiltração, que retratam a passagem da água da superfície para o interior do solo, tendo em conta as suas propriedades físicas e a intensidade de precipitação existente ou, em alternativa, podem ser utilizadas equações de infiltração empíricas que não representam quaisquer processos físicos, mas são calibradas com base em dados observados.

A primeira equação de infiltração obtida, tendo como variáveis os parâmetros físicos do solo, foi a equação de Green-Ampt em 1911, na qual foi assumida a saturação imediata do solo e um deslocamento do tipo pistão por água. Como exemplo de uma equação empírica, pode-se apresentar a equação de Horton (1933, 1939).

5.2. MÉTODO DA CURVA NÚMERO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

No que diz respeito ao método SCS, quando comparado com a abordagem do cálculo da infiltração através do conhecimento das propriedades físicas do solo e pela aplicação de métodos determinísticos, deparamo-nos com algumas desvantagens.

A abordagem determinística para a modelação da infiltração oferece uma maior flexibilidade, devido ao termo $(\theta - \theta_i)$ aguentar uma variação contínua do teor de humidade, no solo e pelo facto de, através da análise do tempo de saturação do solo, ser possível perceber a influência que a precipitação tem, no mesmo.

Na abordagem da determinística, desde que a curva da capacidade de infiltração esteja definida, é possível determinar a taxa máxima de infiltração da água no solo, sendo que, se a taxa de precipitação descer para um valor inferior à curva de capacidade de infiltração, não irá ocorrer escoamento.

A maior desvantagem da abordagem de infiltração é que, dependendo do método, esta requer que os diferentes parâmetros do solo, θ , k_s , ψ , das respetivas equações, sejam definidos, para prever o excesso de escoamento. No entanto estes parâmetros têm uma grande variabilidade espacial e torna-se difícil produzir mapas das propriedades físicas do solo à escala de uma bacia hidrográfica.

5.3. CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO E A CURVA NÚMERO

São necessárias duas equações para descrever o processo de infiltração, uma usada para calcular o tempo necessário até que a saturação ocorra e outra para definir a consequente diminuição da capacidade de infiltração do solo.

Assumindo um valor de precipitação constante, apresenta-se de seguida, a expressão que determina o tempo de saturação de um solo, de Mein and Larsen (1973):

$$t_p = \frac{\Psi_{(\theta-\theta_i)}}{r \cdot \left(\frac{r}{k_s} - 1\right)} \quad (5.1)$$

sendo θ o valor do teor de humidade, na saturação natural do solo, θ_i o teor em humidade inicial, r a taxa de precipitação, k_s a condutividade hidráulica do solo, na sua saturação natural, ψ o potencial de infiltração e t_p o tempo necessário para que a saturação do solo ocorra.

Pode-se ainda definir os termos compostos como:

$$S_f = (\theta - \theta_i) \cdot \psi \quad (5.2)$$

sendo S_f o fator de sucção do armazenamento e r^* a taxa de precipitação normalizada em relação à condutividade hidráulica, dado pela seguinte expressão:

$$r^* = \frac{r}{k_s} \quad (5.3)$$

Substituindo estes termos na equação 5.1, obtém-se a seguinte expressão:

$$t_p = \frac{S_f}{r \cdot (r^* - 1)} \quad (5.4)$$

Para a infiltração após a saturação do solo, no caso em que a precipitação seja constante, Morel-Seytoux (1978) derivaram uma forma generalizada da equação de Philip's:

$$W = W_p + S(\theta_i) \cdot \left(\frac{r^*}{r^* - 1}\right) \cdot \left(\sqrt{t - t_p + \frac{t_p}{2} \cdot \left(\frac{r^*}{r^* - 1}\right)^3} - \sqrt{\frac{t_p}{2} \cdot \left(\frac{r^*}{r^* - 1}\right)^3} \right) + k_s \cdot (t - t_p) \quad (5.5)$$

Onde t é o tempo entre t_p e t_d , ou seja, o tempo da duração da precipitação, w_p é igual a rt_p , ou seja, é a quantidade de água infiltrada até à saturação do solo, $S(\theta_i)$ é igual a $\sqrt{2 \cdot k_s \cdot S}$,

denominando-se de sorvidade de Green-Ampt e W é a profundidade acumulada de infiltração, no período de tempo t .

As equações para os casos em que a precipitação é variável, são mais complexas, envolvendo, no entanto as mesmas incógnitas que as anteriores. A equação que determina o tempo de saturação do solo assume a seguinte forma:

$$t_p = t_{j-1} + \frac{1}{r_j} \cdot \left[\frac{S}{r_j - 1} - \sum_{v=1}^{j-1} r_v (t_v - t_{v-1}) \right] \quad (5.6)$$

Onde j é o período de tempo considerado e v o índice de precipitação, ocorrida antes de t_j . O significado das variáveis é ilustrado na seguinte figura:

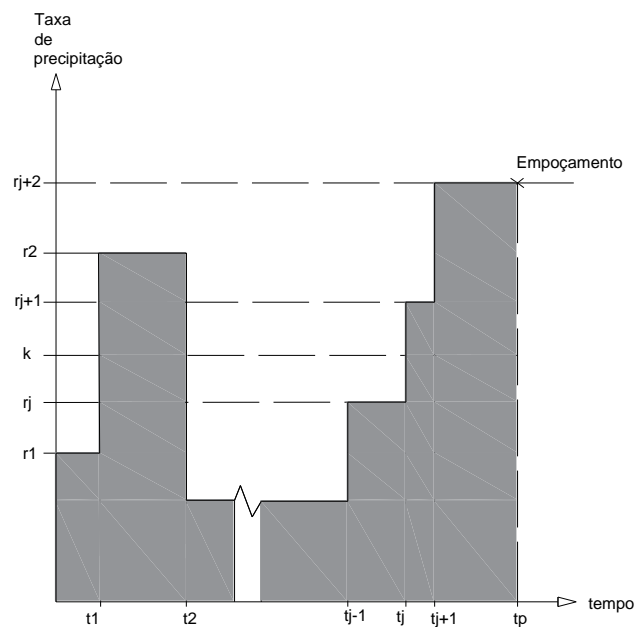


Fig.5.1 – Ilustração das variáveis da equação 5.6

A infiltração após a saturação do solo é calculada pela seguinte expressão:

$$w = w_p + S(w_p, \theta_i) \cdot [\sqrt{t - t_p + B} - \sqrt{B}] + k_s(t - t_p) \quad (5.7)$$

onde, $S(w_p, \theta_i)$ é a sorvidade devida à precipitação, sendo dada pela seguinte expressão:

$$S(w_p, \theta_i) = \sqrt{\frac{2 \cdot k_s (S + w_p)^2}{S}} \quad (5.8)$$

B é dado por:

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{(S + w_p)^2}{k_s \cdot S_f \left(\frac{r_p}{k_s} - 1 \right)^2} \quad (5.9)$$

e r_p é a intensidade da precipitação que origina a saturação do solo. O parâmetro B resulta da exigência do tempo de saturação, sendo a intensidade da precipitação r_p , igual à taxa de infiltração.

A equação 5.7 traduz a profundidade acumulada de infiltração, para um determinado período de tempo t , após t_p . A expressão para a taxa de infiltração instantânea, após a saturação do solo, para um determinado período de tempo t após t_p é:

$$I = \frac{1}{2} \cdot S(w_p, \theta_i) \cdot \frac{1}{\sqrt{t - t_p + B}} + k_s \quad (5.10)$$

Os termos da equação anterior têm as mesmas definições que os da equação 5.7.

Através de uma análise cuidada é possível concluir que apenas são necessários dois parâmetros para caracterizar o processo de infiltração de uma bacia hidrográfica. O primeiro diz respeito aos parâmetros θ , θ_i e ψ . Uma vez que estes aparecem sempre sem conjunto, a sua influência conjunta no escoamento pode ser expressa através do fator de armazenamento de sucção, S_f .

O outro parâmetro necessário é a condutividade hidráulica, natural de saturação, k_s . Todos os outros valores da equação podem ser encontrados usando k_s , S , a duração da precipitação, as características de intensidade da mesma (por exemplo, $S(\theta_i)$, t_p , w_p , r^* , $S(w_p, \theta_i)$) e B .

O problema passa então por encontrar uma correspondência entre o par k_s , S , tendo em conta um determinado valor de CN .

O critério proposto por Hubert *et al.* (1981), para definir uma equivalência entre um determinado par k_s , S e uma Curva Número, para um evento único, é a exigência de que, a mesma quantidade de água produzida pela precipitação, seja absorvida, tanto pelo método de SCS, como por uma abordagem de infiltração.

A figura 5.3 ilustra um evento de precipitação constante e a maneira como as duas abordagens simulam a precipitação.

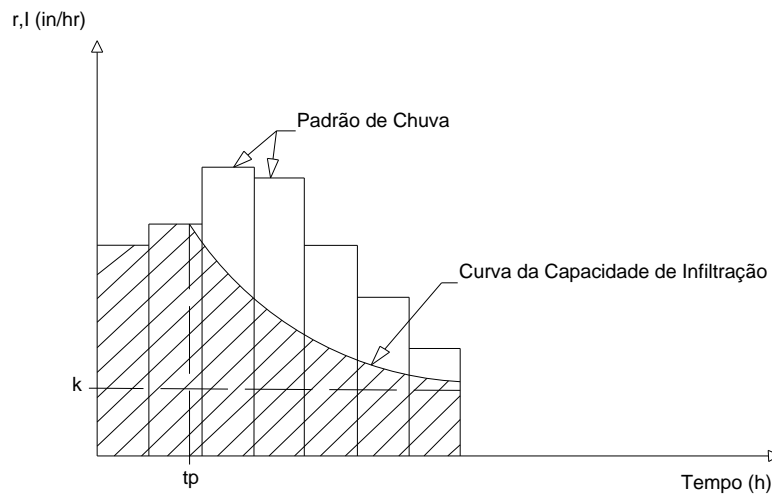


Fig.5.2 – Comparação da taxa de infiltração, pelo método SCS e pela abordagem de infiltração, segundo Hubert *et al.* (1981)

A subtração total da água pelo método de SCS é dado pela seguinte expressão:

$$RET + w = I_a + \frac{S(P - I_a)}{P - I_a + S} \quad (5.11)$$

A subtração total, para a abordagem de infiltração, pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$RET + w = RET + \int_0^{t_D} I \cdot dt = RET + w_p + S(\theta_i) \left(\frac{r^*}{r^* - 1} \right) \left[\sqrt{t_D - t_p + \frac{t_p}{2} \left(\frac{r^*}{r^* - 1} \right)^3} - \sqrt{\frac{t_p}{2} \left(\frac{r^*}{r^* - 1} \right)^3} \right] + k_s(t_D - t_p) \quad (5.12)$$

sendo t_D a duração da precipitação e I a taxa de infiltração.

Ajustando as equações anteriores, 5.12 e 5.13, uma à outra, para que a subtração total nos dois métodos seja idêntica, obtém-se a seguinte expressão:

$$RET + w_p + S(\theta_i) \left(\frac{r^*}{r^* - 1} \right) \left[\sqrt{t_D - t_p + \frac{t_p}{2} \left(\frac{r^*}{r^* - 1} \right)^3} - \sqrt{\frac{t_p}{2} \left(\frac{r^*}{r^* - 1} \right)^3} \right] + k_s(t_D - t_p) = I_a + \frac{S(P - I_a)}{P - I_a + S} \quad (5.13)$$

Pode-se concluir então que, assim como o CN é o único parâmetro que descreve as características do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica inteira, o par equivalente k_s , S é igualmente um parâmetro conjunto que representa as características de infiltração

média global da bacia hidrográfica e deverá ser baseado em cálculos de precipitações que representem uma gama de durações e intensidades razoável.

Para um conjunto representativo de vários eventos de precipitação, foi dado por Hubert *et al.* (1981), um melhor valor de S , para um determinado par k_s, S , através de um programa de computador, onde foi possível definir um conjunto de equivalências de $CN - k_s, S$, e realizar verificações para garantir que os eventos não são considerados, onde a condutividade hidráulica for maior do que a taxa de precipitação, nem onde o tempo, para a subtração inicial, exceda o tempo de duração da chuvada.

Para definir esse conjunto, através do programa de cálculo mencionado, é necessário um conjunto de valores K_s, S representativos da maioria das classes texturais do solo. Este conjunto foi arranjado através de relatórios públicos e inéditos de investigadores das propriedades da humidade do solo.

Para estabelecer uma correspondência entre o $CN - k_s, S$, para as condições de humidade do solo (AMC II), o ponto de partida foi encontrar valores do défice de humidade, $(\theta - \theta_{fc})$, para as várias classes texturais do solo.

As estimativas do parâmetro ψ , humidade efetiva de capilaridade, ou sucção da frente molhada, para as várias classes texturais do solo, foram relatadas por Brakensiek *et al.* (1979). Neste trabalho as estimativas de ψ , foram feitas usando os dados de humidade do solo e os dados de pressão da capilaridade, como ponto de partida. Eles estimaram, inicialmente, as constantes de Brooks e Corey, em 1964, ψ_b e λ , usando a seguinte expressão:

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi_a} \right)^\lambda \quad (5.14.)$$

sendo S_e a saturação efetiva dada por:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (5.15.)$$

em que θ representa a quantidade de água no solo, θ_r o teor de humidade residual no solo, ϕ a porosidade do solo, ψ_a a pressão de capilaridade, ψ_b a pressão do ar e λ o número de vazios do solo.

O melhor valor para θ_r foi obtido variando-o sistematicamente, até que a maior correlação entre o S_e e o ψ_a fosse encontrada.

Brakensiek *et al.* (1979), também citaram, valores de condutividade hidráulica para a saturação natural, k_s .

Os valores dos parâmetros do solo utilizados na correspondência de $CN - k_s, S$, são mostrados no Quadro 5.1:

Quadro 5.1 – Parâmetros hidráulicos das classes texturais do solo, segundo Brakensiek *et al.* (1979)

Solo	Classificação Textural do solo	ψ (mm) ¹	$(\theta - \theta_{fc})$ ²	k_s (mm/hr) ³	$S_f = (\theta - \theta_{fc})\psi$
1	Argila	238.76	0.07	0.33	0.66
2	Argila siltosa	301.75	0.09	0.51	1.07
3	Argila arenosa	153.67	0.12	0.76	0.73
4	Limo argiloso siltoso	284.48	0.08	1.02	0.90
5	Limo argiloso	206.25	0.13	1.02	1.06
6	Limo argiloso arenoso	140.97	0.13	1.52	0.72
7	Limo	176.53	0.14	3.30	0.97
8	Limo siltoso	256.79	0.11	6.60	1.11
9	Limo arenoso	140.97	0.19	10.92	1.05
10	Areia limosa	99.06	0.27	29.97	1.05

1 - H_f é relativo às estimativas de Brakensiek, Engleman, e Rawls (1979), referentes aos relatórios dos progressos das pesquisas cooperativas, entre SCS e AR, "Relação da subtração inicial por infiltração no solo.

2 - São valores retirados do USDA-ARS Technical Bulletin, em 1975.

3 - Valores reportados por Strait, Saxton and Papendick, em 1978, num artigo não publicado, citado por Brakensiek *et al.*

Hubert *et al.* (1981), afirma que o SCS (Soil Conservation Service) não relatou os eventos de precipitação-escoamento usados no desenvolvimento dos seus valores de CN , nem dá qualquer referência ao local onde estes poderão ser encontrados. Apenas demonstrou que as suas Curva Número foram determinadas através da relação entre a intensidade da precipitação e a profundidade do escoamento, para um determinado evento, que produziu o maior escoamento anual, nas suas bacias hidrográficas experimentais. Tendo em conta que as Curva Número foram derivadas entre o início e o meio dos anos 1950, estima-se que o período de registo para as bacias hidrográficas experimentais seja entre 15 e 20 anos.

Devido a este facto, Hubert *et al.* (1981) utilizou mapas de frequências de precipitação com valores compreendidos entre 1 e 1/20.

Assim sendo, um conjunto de eventos de precipitação com períodos de retorno entre 1 e 20 anos, oferecem um conjunto razoável de dados que geram eventos de escoamento da mesma ordem de grandeza daqueles que poderiam ser observados, durante um período de 20 anos, na realidade.

Devido à sensibilidade da equação da infiltração, em relação à intensidade da precipitação, foram realizados por Hubert *et al.* (1981) conjuntos de dados a partir de uma grande variedade

de locais em todos os EUA, a fim de avaliar a influência deste parâmetro na correspondência do $CN - k_s - S$ obtida.

Através de um programa de cálculo, mencionado anteriormente, e de todas as considerações citadas atrás, foi calculado um conjunto de correspondências de $CN - k_s, S$, sendo os resultados finais de k_s apresentados no quadro 5.2, do presente capítulo.

Quadro 5.2 – Valore de k_s e S obtidos para as diversas classes texturais do solo através de um programa de cálculo, Hubert et al. (1981)

Solo	Classe do solo	k_s (mmh ⁻¹)	S (mm)
1	Argila	0.33	16.76
2	Argila siltosa	0.51	27.18
3	Argila arenosa	0.76	18.54
4	Limo argiloso siltoso	1.02	22.86
5	Limo argiloso	1.02	26.92
6	Limo argiloso arenoso	1.52	18.29
7	Limo	3.30	24.64
8	Limo siltoso	6.60	28.19
9	Limo arenoso	10.92	26.67
10	Areia limosa	29.97	26.67

Através das equivalências de $CN - k_s, S$ relatadas anteriormente, foi desenvolvida por Hubert *et al.* (1981) uma equação de regressão que generaliza esses resultados para todos os CN . Na figura 5.4 apresenta-se um gráfico que traduz a condutividade hidráulica k_s , em relação à Curva Número CN e na figura 5.5 apresenta-se um gráfico similar ao anterior, mas relativo à sorvidade, na capacidade de campo, $S(\theta_{fc})$, em relação ao CN .

Os pontos circulares nas Figuras 5.3 e 5.4 representam as correspondências encontradas entre os dados de precipitação do Centro do estado de Oklahoma. Os pontos representados com quadrados representam as texturas do solo com alta condutividade hidráulica, que podem apenas ser encontradas com dados elevados de precipitações intensas, relativos a Miami.

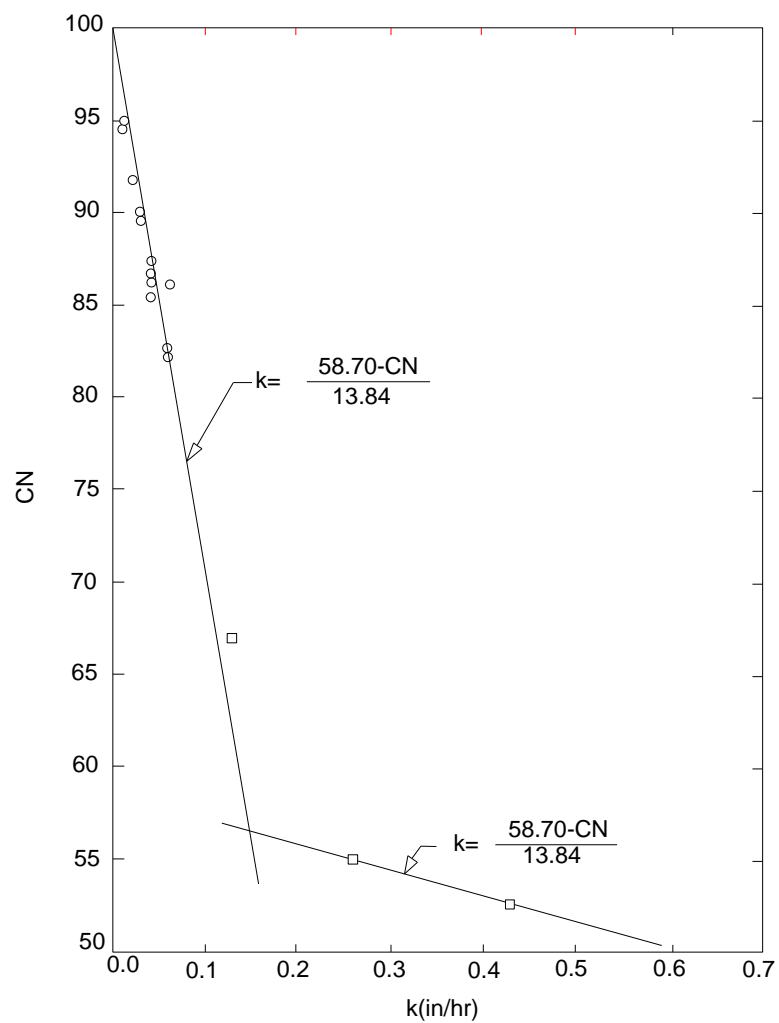


Fig.5.3 – Gráfico da condutividade hidráulica versus CN , adaptado de Hubert *et al.* (1981)

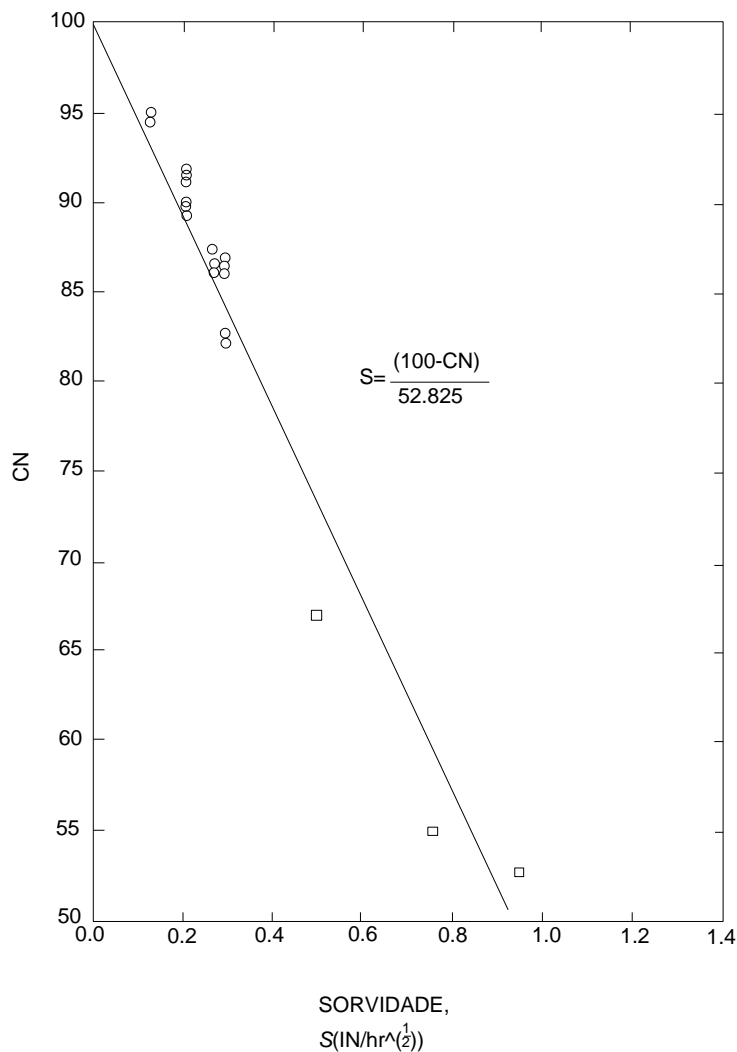


Fig.5.4 – Gráfico da sorvidade versus CN, adaptado de Hubert *et al.* (1981)

As linhas desenhadas nas Figuras 5.3 e 5.4 traduzem as equações de regressão utilizadas para generalizar os resultados obtidos.

Foi fundamentado, pelos mesmos autores, que k_s deverá ser zero, quando o CN for igual a 100. Na figura 5.4, a linha correspondente a $CN < 57$, foi definida por dois pontos obtidos no estudo, em Miami, com o CN de 55.10 e 52.75, sendo que, o ponto de interseção, no gráfico, satisfaz ambas as equações utilizadas para criar gráfico em questão.

Através da utilização das equações de regressão foi construída uma tabela de correspondência por Hubert *et al.* (1981), que dá um par k, S equivalente, para cada CN, no intervalo de 1 e 100. O valor de k foi calculado, utilizando um CN aleatório, a partir da equação de regressão adequada. Seguidamente, para o mesmo valor de CN, calcularam a sorvidade, de uma maneira idêntica à anterior. O fator de armazenamento foi calculado através da

seguinte expressão, sendo que, os valores obtidos têm em conta as condições de capacidade de humidade de campo (AMC II):

$$S = \frac{[S(\theta_{fc})]^2}{2 \cdot k_s} \quad (5.16)$$

5.4. CÁLCULO DO *CN* PARA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DO ALPORTEL

O cálculo do valor do *CN* para os vários tipos de solos, foi realizado tendo em conta o seu grupo hidrológico. Nesta classificação, elaborada por Lança (2000), os solos foram divididos em quatro grupos hidrológicos distintos, A, B, C e D, tendo os mesmos, a seguinte caracterização:

Quadro 5.3 – Grupo hidrológico dos solos e respetiva caracterização

Grupo Hidrológico	Caracterização
A	Baixo potencial de deflúvio. Terrenos muito permeáveis com pouco silte e argila. Os valores mais baixos de <i>CN</i> estão dentro deste tipo.
B	Capacidade de infiltração acima da média após completo humedecimento. Solos arenosos menos profundos que os do tipo A.
C	Capacidade de infiltração abaixo da média depois de pré-saturação. Contém apreciável percentagem de argila.
D	Mais alto potencial de deflúvio. Muito argiloso, quase impermeável. Os valores mais altos de <i>CN</i> estão dentro deste tipo.

De seguida apresenta-se a tabela referente à classificação do *CN*, tendo em conta o grupo hidrológico do solo e o uso do solo:

Quadro 5.4 – Classificação do CN (SCS), adaptado de Lencastre, 1992 e Chow, 1988

Utilização ou cobertura do solo	Condições de superfície	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Culturas arvenses	Segundo maior declive	64	76	84	88
	Segundo curvas de nível	62	74	82	85
	Segundo as curvas de nível e em terraços	60	71	79	82
Rotações de cultura	Segundo maior declive	62	75	83	87
	Segundo curvas de nível	60	72	81	84
	Segundo as curvas de nível e em terraço	57	70	78	82
Pastagens	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
	Pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
	Normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	Boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
Prado permanente	Normal	30	58	71	78
Zonas sociais rurais	Normal	59	74	82	86
Estradas	Pavimento permeável	72	82	87	89
	Pavimento impermeável	74	84	90	92
Florestas	Muito abertas ou de baixa transpiração	56	75	86	91
	Abertas ou de baixa transpiração	46	68	78	84
	Normal	36	60	70	76
	Densas ou de alta transpiração	26	52	62	69
	Muito densas ou de alta transpiração	15	44	54	61
Superfície impermeável		100	100	100	100

Obtidos os valores de CN (II) passou-se à correção desses mesmos valores, correção esta recomendada pelo SCS e feita tendo em conta as condições antecedentes de humidade do solo. Assim sendo, o cálculo do valor de CN (III) corrigido é o seguinte:

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN}{10 + 0.13 \cdot CN} \quad (5.17)$$

Recorreu-se então à correspondência entre os valores de CN e a condutividade hidráulica do solo, mencionado anteriormente, e apresentada na Figura 5.4, de onde resulta:

$$k_s = \frac{100 - CN}{11.43}, \text{ para } CN > 75 \quad (5.18)$$

$$k_s = 58.7 - 0.55 \cdot CN, \text{ para } 36 < CN < 75 \quad (5.19)$$

Conhecendo os valores da condutividade hidráulica, pós-incêndio, obtidos nos quadros 4.3 e 4.8, do Capítulo 4, do presente trabalho, foi possível obter os valores correspondentes de CN através de:

$$CN = 100 - 11.43 \cdot k_s, \text{ para } CN > 75 \quad (5.20)$$

$$CN = 58.7 - 0.55 \cdot k_s, \text{ para } 36 < CN < 75 \quad (5.21)$$

No Quadro 5.5 são apresentados os valores de CN obtidos para os vários tipos de solos em cenário pré-incêndio, $m = 0 \text{ kgm}^{-2}$ e após terem sido afetados por um incêndio com diferentes quantidades de material combustível ardido, $m = [4, 8, 16] \text{ kgm}^{-2}$.

Quadro 5.5 – Valores de CN obtidos para os vários tipos de solos e para diferentes valores de m

CN	$m=0.0$ (kgm^{-2})	$m=4.0$ (kgm^{-2})	$m=8.0$ (kgm^{-2})	$m=16.0$ (kgm^{-2})
Argila	96.2	96.5	96.8	97.4
Argila siltosa	94.2	94.7	95.1	96.0
Argila arenosa	91.3	92.0	92.7	94.1
Limo argiloso siltoso	88.4	89.3	90.2	92.1
Limo argiloso	85.5	86.6	87.7	90.1
Limo argiloso arenoso	82.6	84.0	85.4	88.1
Limo	56.9	57.3	57.6	58.4
Limo siltoso	55.1	55.8	56.6	58.1
Limo arenoso	52.7	54.0	55.2	57.7
Areia limosa	42.2	45.7	49.1	56.0

Sendo k_s o valor da condutividade hidráulica para os vários tipos de solos, corrigido através do parâmetro Kk_s . Os valores do parâmetro Kk_s foram obtidos tendo em conta a massa, m e a condutividade hidráulica resultante dos ensaios laboratoriais realizados, para os vários tipos de solo, no âmbito deste trabalho. A massa m foi obtida tendo em conta o material combustível, M , aplicado a cada uma das amostras experimentais, encontrando-se os seus valores nos Quadros 4.1 e 4.2, do capítulo 4, do presente trabalho.

Os valores de k_s obtidos, para os vários tipos de solos, tendo em conta massa de material combustível por unidade de área, m , são dados no Quadro 5.6 e representados na Figura 5.6:

Quadro 5.6 – Valores de k_s obtidos, para os vários tipos de solos e valores de m

k_s (kgm^{-2})	$m=0.0$ (kgm^{-2})	$m=4.0$ (kgm^{-2})	$m=8.0$ (kgm^{-2})	$m=16.0$ (kgm^{-2})
Argila	0.33	0.30	0.28	0.23
Argila siltosa	0.51	0.47	0.43	0.35
Argila arenosa	0.76	0.70	0.64	0.52
Limo argiloso siltoso	1.02	0.94	0.85	0.69
Limo argiloso	1.27	1.17	1.07	0.87
Limo argiloso arenoso	1.52	1.40	1.28	1.04
Limo	3.30	2.61	1.92	0.53
Limo siltoso	6.60	5.22	3.84	1.07
Limo arenoso	10.92	8.63	6.34	1.76
Areia limosa	29.97	23.69	17.41	4.84

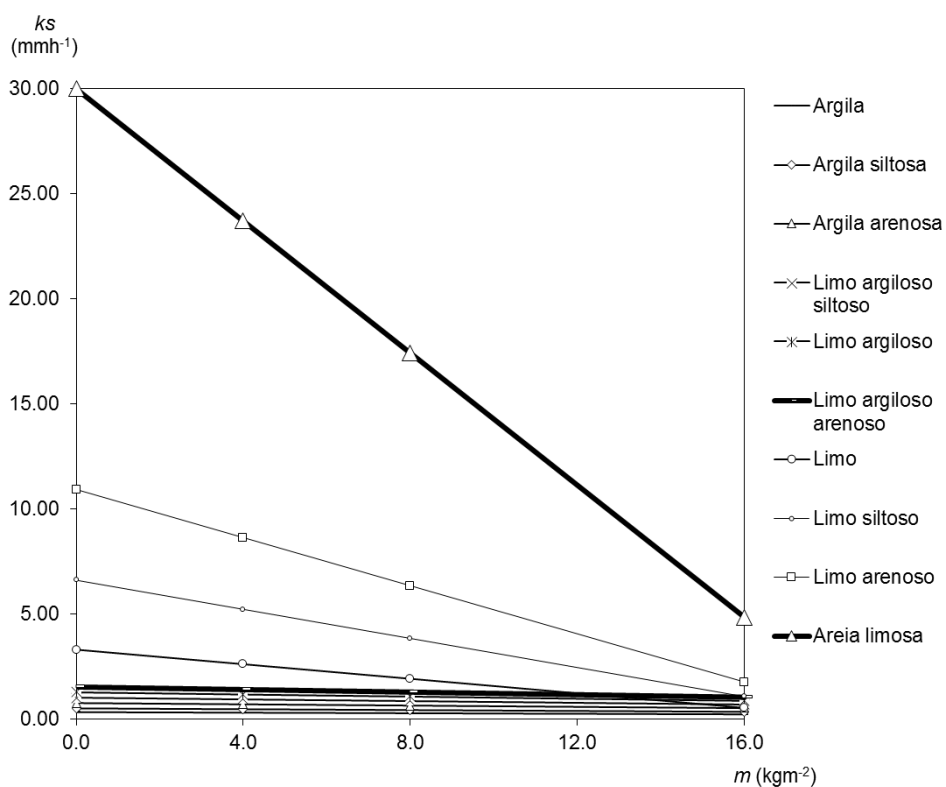


Fig.5.5 – Variação de k_s em função de m , para diferentes classes texturais de solo

Obtidos os valores de CN , passou-se então ao cálculo dos fatores de correção, K_{CN} , tendo em conta que $K_{CN} = CN_{pós-incêndio} / CN_{pré-incêndio}$. A figura seguinte mostra os valores obtidos para as diferentes classes texturais de solo, tendo em conta as respetivas massas de material combustível, m :

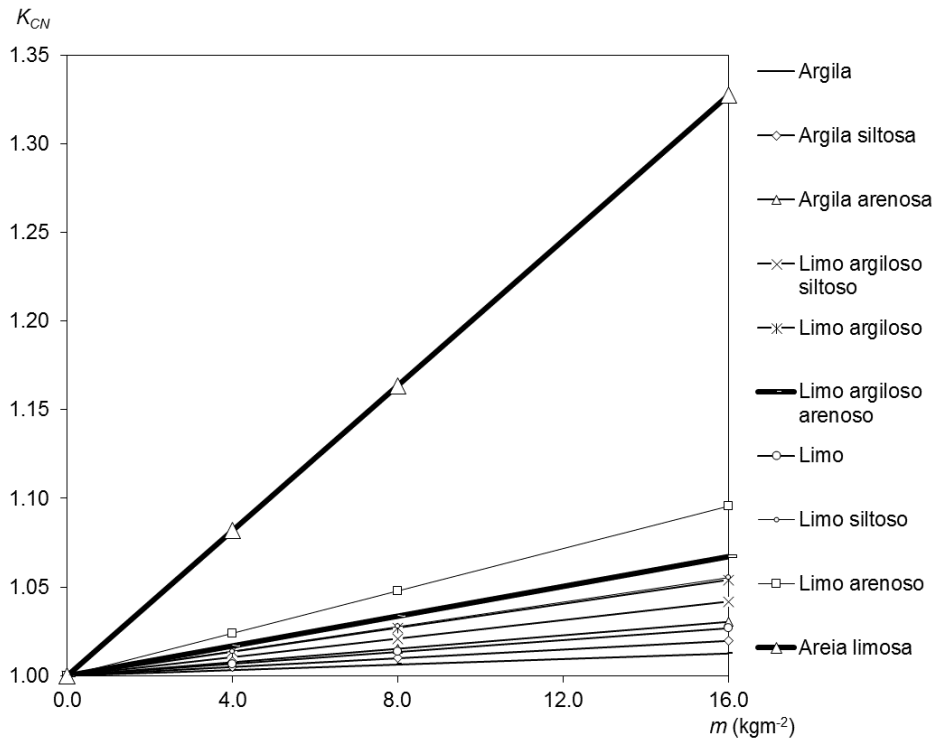


Fig.5.6 – Valores de K_{CN} em função de m para diferentes classes texturais de solo

Através da observação da Tabela 3, é possível identificar que com o aumento da massa de material combustível, m , e consequente intensidade do incêndio, a condutividade hidráulica, k_s , diminui, notando-se, no entanto, que essa variação é mais acentuada em solos de textura arenosa do que para solos de textura argilosa.

No que diz respeito aos valores de K_{CN} é possível concluir que os valores deste aumentam, com o aumento de m . O valor de $K_{CN \text{ pós-incêndio}}$ a aplicar no modelo da bacia hidrográfica em estudo, será maior nos solos de textura arenosa e menor em solos de textura argilosa.

É de salientar que a modificação na curva número caracterizada neste estudo deriva do efeito do incêndio sobre a condutividade hidráulica do solo, contemplando apenas o efeito do calor, deposição de cinzas e presença de compostos voláteis no solo. Analisado à escala da bacia hidrográfica, um incêndio florestal também induz alterações no coberto vegetal, com consequências significativas na relação P/Pe .

Podem-se citar estudos de outros autores que calibraram valores de CN com base em hidrogramas de cheia, observados antes e após incêndios florestais, obtendo desta forma o

resultado conjunto do efeito das alterações no solo e no coberto vegetal sobre o número de escoamento.

Higginson e Jarnecke (2007) apresentam um conjunto de regras para determinar o efeito de um incêndio florestal no número de escoamento, em função da severidade do incêndio, Quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Valores de $CN_{pré-incêndio}$ e $CN_{pós-incêndio}$, Higginson e Jarnecke (2007)

Severidade do Incêndio	$CN_{pós-incêndio}$
Alta	$CN_{pré-incêndio} + 15$
Moderada	$CN_{pré-incêndio} + 10$
Baixa	$CN_{pré-incêndio} + 5$

Livingston *et al.* (2005), tendo em conta a análise de dados de 31 bacias hidrográficas, apresenta fatores de correção dos valores, em função da percentagem da bacia hidrográfica ardida, traduzidos pelo rácio $CN_{pós-incêndio}/CN_{pré-incêndio}$, em função da severidade do incêndio, podendo ser observados na Figura 5.7:

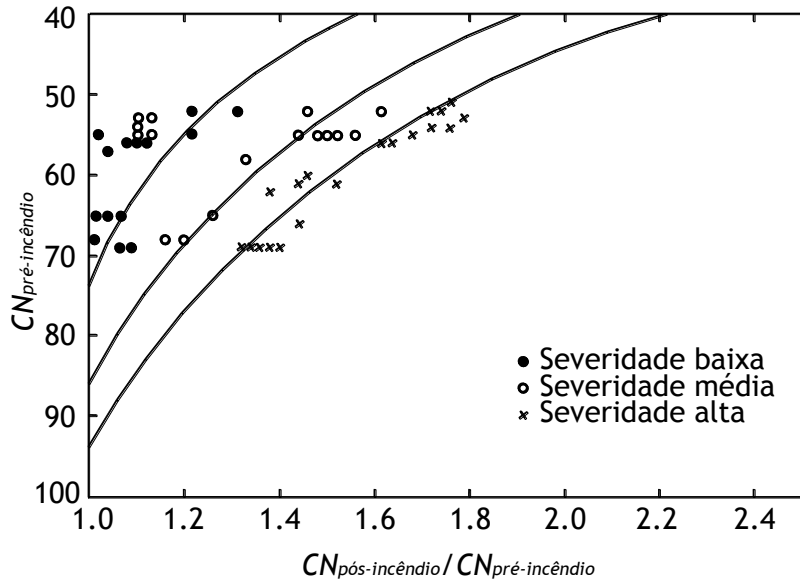


Fig.5.7 – Valores de $K_{CN_{pós-incêndio}}/K_{CN_{pré-incêndio}}$ em função da severidade do incêndio e de $K_{CN_{pré-incêndio}}$, adaptado de Livingston *et al.* (2005)

6. EFEITO DO INCÊNDIO NA RESPOSTA HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA

6.1. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÉQUA

6.1.1. LOCALIZAÇÃO DA BACIA

A bacia hidrográfica do Rio Séqua situa-se em Portugal, no Sotavento Algarvio, a Norte de Tavira, com uma área de 222.22 km² que se estende desde perto de São Brás de Alportel até Tavira, nascendo na serra e desaguando na Ria Formosa, na zona das Quatro Águas. Este curso de água adquire o nome de Rio Gilão a partir da secção em que passa a sofrer o efeito da maré e constitui a linha de água mais importante do concelho de Tavira e do sistema Hidrográfico do Sotavento Algarvio. A localização da bacia hidrográfica do Rio Séqua pode ser identificada na Figura 6.1.



Fig.6.1 – Localização da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel em Portugal Continental, adaptado de Lança, *et al.* (2014)

6.1.2. GEOMORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA

No desenvolvimento deste estudo optou-se, primeiramente, pela obtenção e reunião das folhas nº 589, 590, 591, 598, 599, 600, 607 e 608 da carta militar de Portugal de continental à escala 1:25000, que correspondem à bacia hidrográfica em estudo. Passou-se, seguidamente, à junção das respetivas cartas, através dos pontos de concordância, nomeadamente das linhas de água, unindo, adequadamente todas as oito folhas da carta militar.

Passou-se então, através do *software* AutoCad, à delimitação das linhas de água principais da bacia hidrográfica, importantes para a decisão das várias sub-bacias principais a delimitar na área em estudo.

Identificaram-se cinco sub-bacias com características fisiográficas distintas, as quais foram denominadas de, sub-bacia hidrográfica MJudeu, sub-bacia hidrográfica Alportel1, sub-bacia hidrográfica Alportel2, sub-bacia hidrográfica ASeca e sub-bacia hidrográfica Séqua, situando-se todas elas a Norte de Tavira, tal como mencionado anteriormente. A maior sub-bacia é Alportel 1, seguindo-se ASeca, MJudeu, Séqua, sendo a mais pequena Alportel 2. No que diz respeito ao tipo de solos, cada uma das sub-bacias é composta por vários tipos de solos, sendo os solos denominados Ex e Vcd, aqueles com maior predominância, na bacia hidrográfica. Relativamente à declividade das sub-bacias é a bacia MJudeu que apresenta uma maior declividade, seguindo-se a bacia a ASeca, Alportel1, Alportel2 e, por fim, com menor declividade, a bacia Séqua.



Fig.6.2 – Bacia Hidrográfica da Ribeira do Alportel e suas 5 sub-bacias

A Figura 6.3 identifica a área ardida no incêndio de Catraia em 2012. Este incêndio florestal de catraia teve início próximo das localidades de Catraia e Fonte de Corcho, no concelho de Tavira. Ocorrido em julho de 2012, afetou os concelhos de Tavira e São Brás de Alportel (Figura 11), teve uma duração de cinco dias e, segundo o Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), deflagrou numa área de 24843 ha (Viegas *et al.* 2012), sendo um dos maiores incêndios registados em Portugal nos últimos anos.

A área atingida por este incêndio foi, na sua maioria, constituída por matos, 61%, floresta, 23%, uso agrícola, 14%, e outros usos, 2%. O sobreiro e o pinheiro manso eram os tipos de povoamentos florestais com maior expressão na área ardida (Viegas *et al.* 2012).

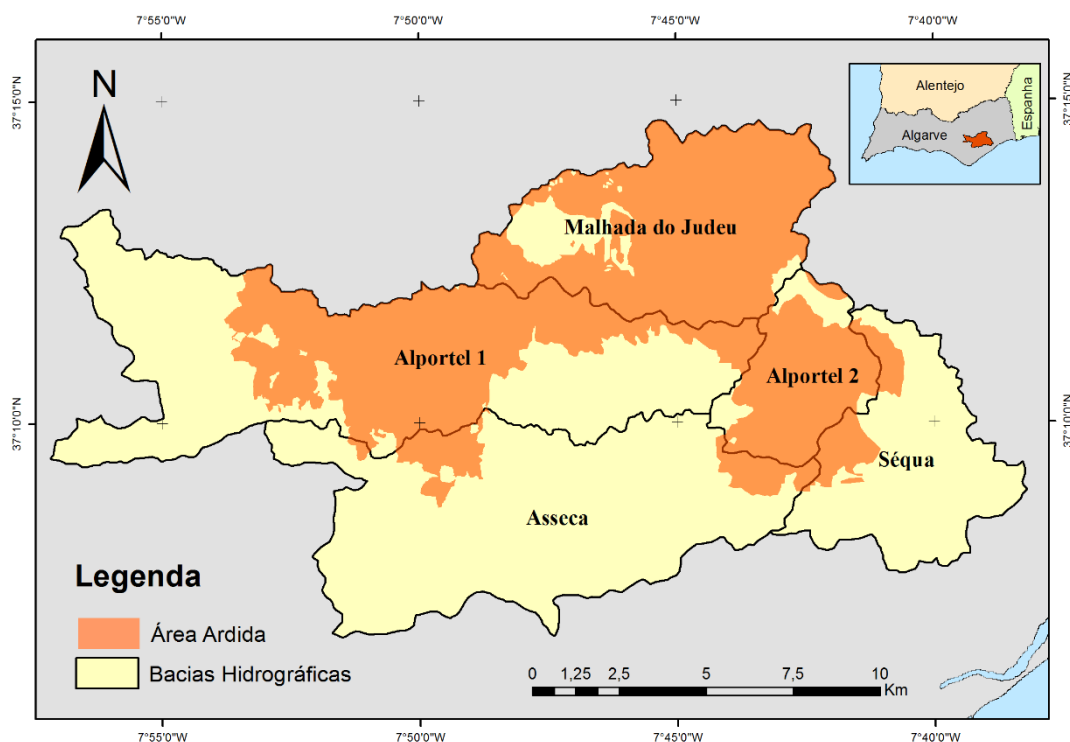


Fig.6.3 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Gilão e a respetiva área ardida no incêndio de Catraia-Tavira em 2012

Os principais parâmetros descritivos da geomorfologia de cada uma das sub-bacias consideradas são apresentados no Quadro 6.1:

Quadro 6.1 – Parâmetros descritivos da geomorfologia das sub-bacias

Sub-bacias	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
Área (km ²)	75.89	16.27	62.55	40.00	27.52
Perímetro (km)	3688.84	1128.27	1591.50	2920.38	714.12
Fator de compacidade	2.12	1.33	1.78	1.48	1.63
Comprimento da linha de água principal (km)	39.09	9.54	22.09	13.17	7.78
Declividade equivalente constante	0.0074	0.0041	0.0102	0.0169	0.0021

Para a obtenção de algumas das características da bacia hidrográfica recorreu-se ao *software* ArcGis. Neste *software*, colocou-se, primeiramente, uma capa com a delimitação das cinco

sub-bacias, seguidas das folhas nº 589, 590, 591, 598, 599, 600, 607 e 608, a carta militar de Portugal, cartas de uso e ocupação do solo, cartas de solos e imagens *LANDSAT_7*. Com base nas imagens *LANDSAT_7* calcularam-se os índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para o ano 2015, referentes ao mês de Junho e o índice *Normalized Burn Ratio* (dNBR) para os anos 2012, 2013 e 2014, referentes ao mês de Agosto. Com base no índice NDVI foi possível estimar a biomassa por unidade de área. Por fim, intersetaram-se as cartas atrás mencionadas, obtendo 34034 polígonos distintos, cobrindo a totalidade da área da bacia hidrográfica do Rio Gilão, cada um com identificadores únicos para cada um dos temas acima mencionados.

6.1.3. PEDOLOGIA DA BACIA

Desta forma, apresenta-se na Figura 6.4 o resultado resultante da interseção das sub-bacias hidrográficas, com as classes taxonómicas do solo, classificadas de acordo com a classificação do Serviço de Reconhecimento e de Ordenamento Agrário (S.R.O.A.).

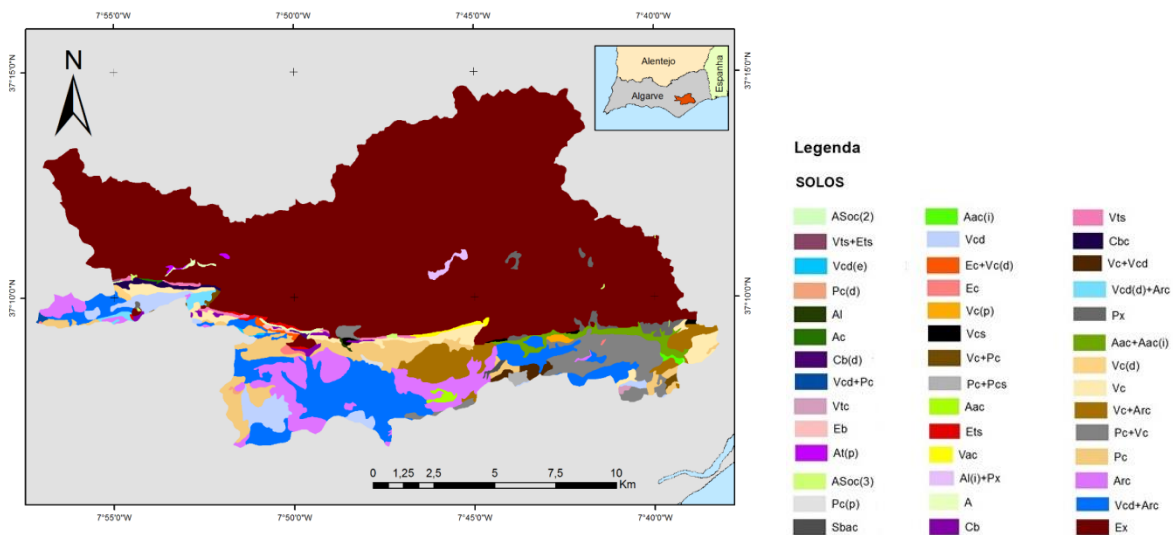


Fig.6.4 – Classes taxonómicas do solo da bacia hidrográfica do Rio Gilão

Através do ábaco triangular para a classificação textual e das percentagens de argila, silte e areia, obtidas com base em Kopp *et al.* (1989) foi possível obter valores médios para a textura das classes taxonómicas dos solos encontrados na bacia hidrográfica do Rio Gilão. Na Figura 6.5 é possível observar a localização de cada solo no ábaco triangular:

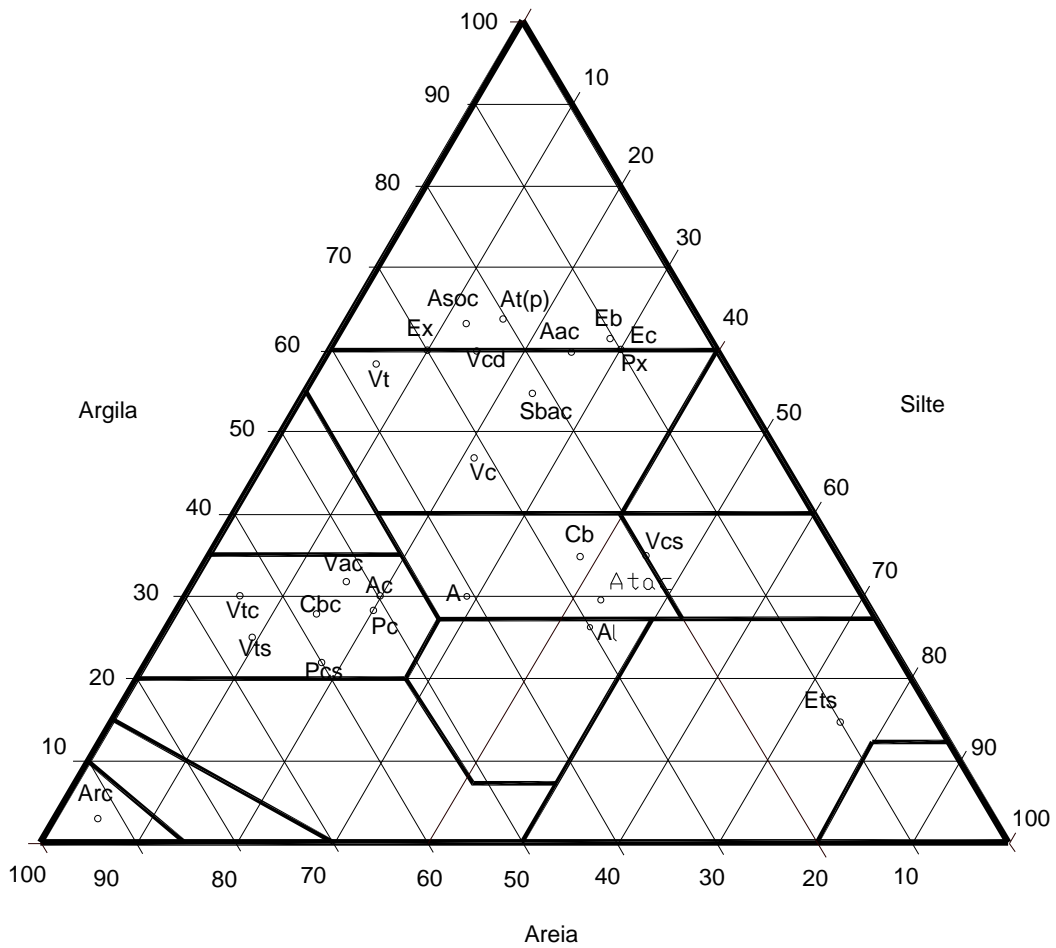


Fig.6.5 – Ábaco triangular para a classificação textural dos solos do SROA de acordo com valores médios de Kopp *et al.* (1989)

Com base em Kopp *et al.* (1989) e na carta de solos de Portugal, apresenta-se no Quadro 6.3 as classes taxonómicas dos solos da bacia hidrográfica do Séqua, assim como as respetivas percentagens de argila silte e areia e sua classificação textural pelo ábaco triangular de FAO:

Quadro 6.2 – Classes taxonómicas dos solos da bacia Hidrográfica do Rio Séqua, textura e classificação segundo o ábaco triangular.

	Classe taxonómica do solo (SROA)	% Argila	% Silte	% Areia	Classificação dos solos
A	Aluviossolos modernos não calcários de textura mediana	30	29	41	Limo argiloso
Aac	Aluviossolos modernos calcários de textura pesada	60	24	16	Argila
Ac	Aluviossolos modernos calcários de textura mediana	30	20	50	Limo argiloso arenoso
Al	Aluviossolos modernos não calcários de textura ligeira	26	44	30	Limo
Arc	Afloramentos rochosos de calcário	-	-	-	Areia
Asoc	Áreas sociais rurais	-	-	-	Argila
At(p)	Aluviossolos antigos não calcários de textura mediana	-	-	-	Argila
Atac	Aluviossolos antigos calcários de textura pesada	29	42	29	Limo argiloso
Cb	Barros castanhos-avermelhados não calcários de basaltos ou doleritos	35	37	28	Limo argiloso
Cbc	Barros castanho-avermelhados calcários não descarbonatados	28	14	58	Limo argiloso arenoso
Eb	Litossolos dos climas de regime xérico de basaltos ou doleritos ou outras rochas eruptivas básicas	-	-	-	Argila
Ec	Litossolos dos climas de regime xérico de calcários compactos ou dolomias	60	30	10	Argila
Ets	Litossolos dos climas de regime xérico de grés de Silves ou rochas afins	15	10	75	Limo siltoso
Ex	Litossolos dos climas de regime xérico de xistos ou grauvaques	60	30	10	Argila
Pc	Solos calcários pardos dos climas de regime xérico normais, de calcários compactos	28	20	52	Limo argiloso arenoso
Pcs	Solos calcários pardos dos climas de regime xérico normais, de margas ou materiais afins	22	18	60	Limo argiloso arenoso
Px	Solos mediterrâneos pardos de materiais não calcários, normais de xisto ou grauvaques	60	30	10	Argila
Sbac	Solos de baixas calcários de textura pesada	55	23	22	Argila
Vac	Solos calcários vermelhos dos climas de regime xérico normais, de rochas detríticas argiláceas calcárias	32	15	53	Limo argiloso arenoso
Vc	Solos calcários vermelhos dos climas de regime xérico normais, de calcários	47	21	32	Argila
Vcd	Solos mediterrânicos vermelhos ou amarelos de materiais calcários normais, de calcários compactos ou dolomias	60	15	25	Argila
Vcs	Solos calcários vermelhos dos climas de regime xérico normais, de "grés de silves" calcários	35	20	45	Limo argiloso
Vt	Solo litólicos não húmicos pouco insaturados normais de arenitos grosseiros	58	5	37	Argila
Vtc	Solos mediterrânicos vermelhos ou amarelos de materiais não calcários de arenitos	30	6	64	Limo argiloso arenoso
Vts	Solo litólicos não húmicos pouco insaturados normais de "grés de Silves" ou rochas afins	25	9	66	Limo argiloso arenoso

As áreas ocupadas por solo de cada uma das classes taxonómicas, apresentadas anteriormente, e a respetiva percentagem relativa à área total da bacia hidrográfica em questão, são indicadas no seguinte quadro 6.3:

Quadro 6.3 – Áreas das classes taxonómicas do solo e respetiva percentagem face à área total da bacia hidrográfica do Rio Séqua

Classe taxonómica do solo (SROA)	Área (m ²)	Área (%)	Classes taxonómicas do solo	Área (m ²)	Área (%)
A	442841.37	0.20	Pc(p)	158901.93	0.07
Aac	369132.53	0.17	Pc+Pcs	359404.10	0.16
Aac(i)	180609.91	0.08	Pc+Vc	7228958.26	3.25
Aac+Aac(i)	2243538.15	1.01	Px	1551199.52	0.70
Ac	73297.35	0.03	Sbac	172660.20	0.08
Al	65855.57	0.03	Vac	388077.03	0.17
Al(i)+Px	434942.52	0.20	Vc	4678675.30	2.11
Arc	10478763.94	4.72	Vc(d)	227022.95	0.10
Asoc(2)	6647.95	0.003	Vc(p)	260180.94	0.12
Asoc(3)	156613.15	0.07	Vc+Arc	5576567.62	2.51
At(p)	139003.71	0.06	Vc+Pc	310423.05	0.14
Cb	614873.56	0.28	Vc+Vcd	712917.09	0.32
Cb(d)	74281.79	0.03	Vcd	4478537.21	2.02
Cbc	704999.96	0.32	Vcd(d)+Arc	764840.67	0.34
Eb	133895.64	0.06	Vcd(e)	64262.28	0.03
Ec	242071.54	0.11	Vcd+Arc	17631271.57	7.93
Ec+Vc(d)	238310.97	0.11	Vcd+Pc	96100.79	0.04
Ets	385248.22	0.17	Vcs	308771.76	0.14
Ex	150450577.25	67.70	Vtc	122792.22	0.06
Pc	8932179.70	4.02	Vts	669518.98	0.30
Pc(d)	65574.13	0.03	Vts+Ets	27159.06	0.01

As três classes do solo mais representativas são Ex, Vcd e Arc. Segundo, Kopp, *et al.* (1989). Os solos Ex, são litosolos dos climas de regime xérico de xistos ou grauvaques, um dos solos mais existente na Serra Algarvia. Os solos Vcd são solos mediterrânicos vermelhos ou amarelos, de materiais calcários normais, de calcários compactos ou dolomias, constituídos por material argiloso, isentos de calcários, sendo dos solos mais difundidos. Os afloramentos rochosos de calcário são designados Arc.

6.1.4. USOS DO SOLO

Apresenta-se nesta secção os os usos do solo de acordo com a carta COS'90. A Figura 6.3 traduz as respetivas classes, da bacia hidrográfica do Rio Séqua:

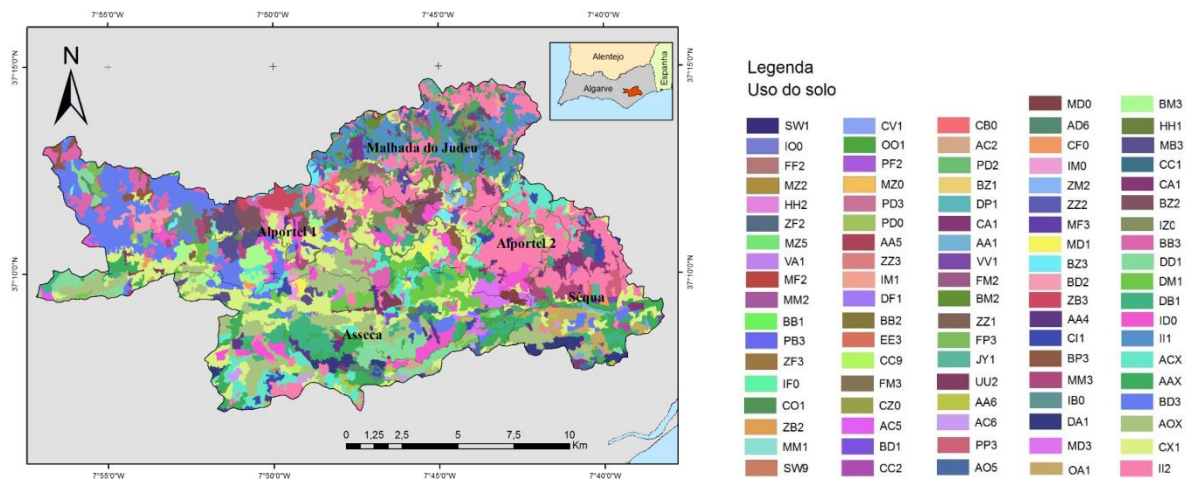


Fig.6.6 – Classes de uso do solo na bacia hidrográfica do Séqua, segundo a carta COS'90

A Tabela 6.4 indica os usos do solo, presentes na bacia hidrográfica do Rio Séqua, de acordo com a carta Agrícola e Florestal de Portugal:

Quadro 6.4 – Usos do solo da bacia Hidrográfica da Ribeira do Alportel

Classes de uso do solo		Classes de uso do solo	
AVX	Pomar e vinha	CC9	Culturas anuais
VV1	Vinha	CI1	Culturas anuais
ID0	Vegetação arbustiva e medronheiro	CX1	Culturas anuais
II2	Vegetação arbustiva e mato baixo	JJ1	Área descoberta sem ou com pouca vegetação
AA1	Citrinos	SW1	Zonas industriais e comerciais
AA4	Amendoeiras	SW9	Outras infraestruturas e equipamentos
AA5	Figueiras	UU2	Tecido urbano descontínuo
AA6	Alfarrobeiras	AD6	Alfarrobeiras e medronheiro
AAX	Misto de pomares	BB1	Sobreiro
CA1	Culturas anuais e pinheiro manso	BB2	Sobreiro
OA1	Olival e pomar	BB3	Sobreiro
OO1	Olival	BD1	Sobreiro e medronheiro
ABX	Misto de sobreiros e citrinos	BD2	Sobreiro e medronheiro
AC4	Misto pomar e cultura anual	BM2	Sobreiro e pinheiro manso
AC5	Misto pomar e cultura anual	BP3	Sobreiro e pinheiro bravo
AC6	Misto pomar e cultura anual	BZ1	Sobreiro e azinheira
ACX	Pomar e cultura anual	BZ2	Sobreiro e azinheira
AO5	Pomar e olival	BZ3	Sobreiro e azinheira
AOX	Pomar e olival	CA1	Culturas anuais e pomar
BD3	Sobreiros e medronheiro	CA2	Culturas anuais e pomar
BM3	Sobreiro e pinheiro manso	CB0	Culturas anuais e sobreiro
DA1	Medronheiro e pomar	CF0	Culturas anuais e outras folhosas
DB1	Medronheiro e sobreiro	CI1	Áreas principalmente agrícolas com espaços naturais importantes
DD1	Medronheiro e pomar	CO1	Culturas anuais e olival
DM1	Medronheiro e pinheiro manso	CZ0	Culturas anuais e azinheira
IA0	Vegetação arbustiva e pomar	DF1	Medronheiro e outras folhosas
IM0	Vegetação arbustiva e pinheiro manso	DP1	Medronheiro e pinheiro bravo
MB3	Pinheiro manso e sobreiro	EE3	Eucalipto
MD1	Pinheiro manso e medronheiro	FM2	Outras folhosas e pinheiro manso
MM1	Pinheiro manso	FP3	Outras folhosas e pinheiro bravo
CC1	Culturas anuais	HH1	Cursos de água
CC2	Culturas anuais	IB0	Vegetação arbustiva e sobreiro
ID0	Vegetação arbustiva e medronheiro	MF2	Pinheiro manso e outras folhosas
IF0	Vegetação arbustiva e outras folhosas	MZ2	Pinheiro manso e Azinheira
II1	Pastagens naturais pobres	MM2	Pinheiro manso
IZ0	Vegetação arbustiva e azinheira	PF2	Pinheiro bravo e outras folhosas
MD0	Pinheiro manso e medronheiro	VA1	Vinha e Pomar
MD3	Pinheiro manso e medronheiro	AC2	Misto pomar e cultura anual
MF3	Pinheiro manso e outras folhosas	CV1	Culturas anuais e vinha
MM3	Pinheiro manso	FF2	Outras folhosas
MZ0	Pinheiro manso e azinheira	HH2	Lagoas e albufeiras
MZ5	Pinheiro manso e azinheira	IM1	Pastagens naturais pobres e pinheiro manso
PB3	Pinheiro bravo e sobreiro	IO0	Olival abandonado
PD0	Pinheiro bravo e medronheiro	JY1	Praia, dunas, areias e solos sem cobertura vegetal
PD2	Pinheiro bravo e medronheiro	ZF2	Azinheira e outras folhosas
PD3	Pinheiro bravo e medronheiro	ZF3	Azinheira e outras folhosas
PP3	Pinheiro bravo	ZM2	Azinheira e pinheiro manso
ZB2	Azinheira e sobreiro	ZZ1	Azinheira
ZB3	Azinheira e sobreiro	ZZ2	Azinheira
ZZ3	Azinheira		

Apresenta-se de seguida, a área ocupada por cada um dos usos do solo, mencionados acima, e a respetiva percentagem da área total da bacia hidrográfica em questão:

Quadro 6.5 – Áreas das classes de uso do solo e respetivas percentagens

Classes de uso do solo	Área (m ²)	Área (%)	Classes de uso do solo	Área (m ²)	Área (%)
AAX	14790934.03	6.66	HH2	22710.56	0.01
ACX	9516694.48	4.28	IB0	2411087.27	1.08
CA1	319155.87	0.14	ID0	8184052.25	3.68
CC1	3525633.04	1.59	IF0	50160.20	0.02
CX1	23963011.62	10.78	IM0	798673.32	0.36
CZ0	180013.33	0.08	MB3	3287376.25	1.48
II1	8957016.52	4.03	MD0	760951.61	0.34
II2	30430540.32	13.69	MD1	925002.90	0.42
IM1	147716.03	0.07	MD3	2536167.98	1.14
IO0	6802.35	0.003	MF2	35155.07	0.02
IZ0	4846717.87	2.18	MM1	72990.72	0.03
JY1	620224.49	0.28	MM3	2222167.57	1.00
MF3	881968.85	0.40	MZ2	22014.05	0.01
MM2	40656.02	0.02	MZ5	28277.91	0.01
OA1	2546901.62	1.15	OO1	87305.51	0.04
UU2	658138.94	0.30	PF2	93836.30	0.04
ZM2	813093.84	0.37	PP3	733795.92	0.33
ZZ2	850286.93	0.38	SW9	78571.55	0.04
ZZ3	134029.68	0.06	VV1	445153.76	0.20
AA1	406069.14	0.18	ZZ1	569653.11	0.26
AA4	1918555.14	0.86	AA5	127516.64	0.06
AA6	692915.81	0.31	AD6	771297.92	0.35
AC6	728445.33	0.33	CC9	169440.96	0.08
AO5	745487.07	0.34	DA1	2530209.93	1.14
AOX	18043490.40	8.12	AC2	276468.78	0.12
BB3	5283853.41	2.38	BD2	1244130.87	0.56
BD1	205608.04	0.09	CB0	250623.00	0.11
BD3	16886265.74	7.60	VA1	32050.62	0.01
BM2	457574.47	0.21	AC5	191733.03	0.09
BM3	3100740.30	1.40	BB1	44061.06	0.02
BP3	2088053.13	0.94	BB2	162967.17	0.07
BZ2	4099785.22	1.84	BZ1	300904.06	0.14
BZ3	934407.79	0.42	CO1	61170.26	0.03
CA1	4020411.53	1.81	DF1	147978.66	0.07
CC2	214148.60	0.10	DP1	316978.31	0.14
CF0	778663.19	0.35	FP3	588873.63	0.26
CI1	1924239.26	0.87	MZ0	95712.62	0.04
CV1	81356.89	0.04	PB3	45666.43	0.02
DB1	7809825.52	3.51	PD0	124349.30	0.06
DD1	5818990.12	2.62	PD2	290843.22	0.13
DM1	5842478.66	2.63	PD3	107797.13	0.05
EE3	165188.83	0.07	SW1	2510.80	0.001
FF2	19961.44	0.01	ZB2	69396.90	0.03
FM2	448351.33	0.20	ZB3	1480684.96	0.67
FM3	176884.22	0.08	ZF2	26640.94	0.01
HH1	3228218.80	1.45	ZF3	46885.26	0.02

As classes de uso e ocupação do solo mais representativas são vegetação arbustiva e mato baixo, II2, culturas anuais, CX1, e Pomares e olivais, AOX.

6.1.5. CLASSES DE INFILTRAÇÃO

As classes de infiltração foram geradas através da interseção das classes taxonómicas dos solos com as classes de uso do solo, recorrendo-se ao *software* ArcGis. Assim sendo, a cada uma das classes de infiltração, corresponde uma combinação de uma classe taxonómica do solo com um tipo de uso do solo. A Figura que se segue traduz os valores de $CN_{pré-incêndio}$ atribuídos a cada uma das classes de infiltração de acordo com os critérios definidos em Chow *et al.* (1988). Segundo o mesmo autor, tendo em conta os usos do solo definidos anteriormente e os grupos hidrológicos do solo preconizados no método da curva número do SCS, A, B, C e D, definiram-se os valores de CN correspondentes a cada classe de infiltração.

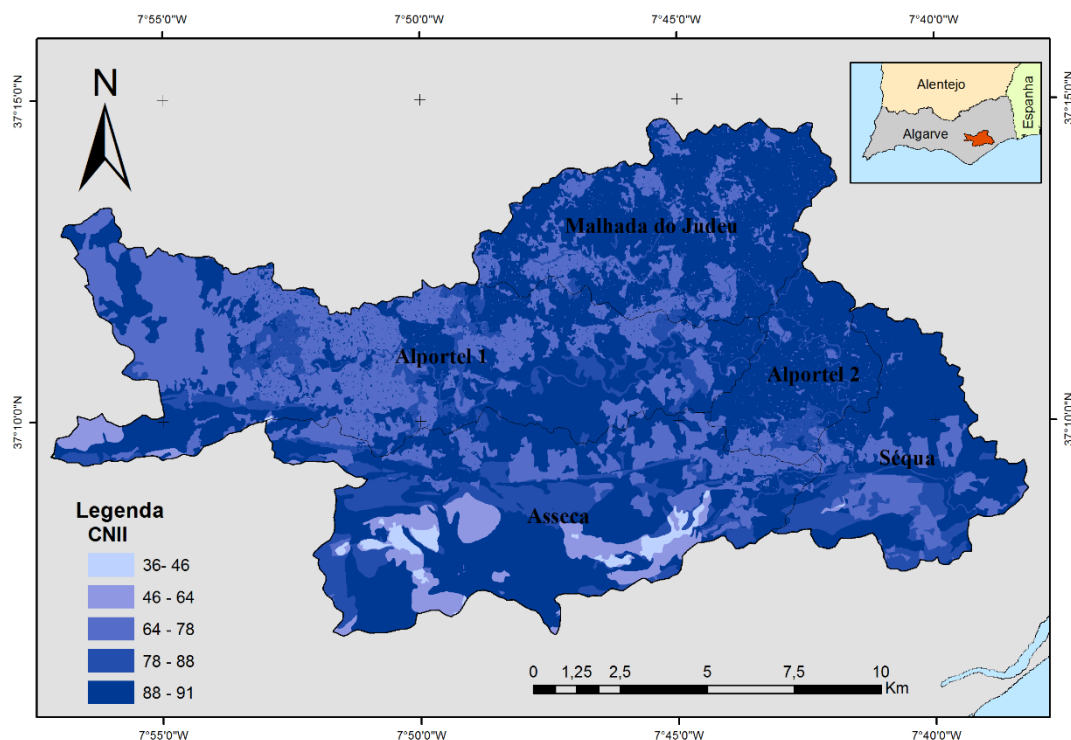


Fig.6.7 – Valores de CNII da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel

6.1.6. ÍNDICE dNBR

O índice *difference Normalized Burn Ratio* (dNBR) foi também um parâmetro muito importante neste trabalho, permitindo a classificação da severidade do incêndio em 4 classes: recuperada, dNBR 1, baixa, dNBR 2, média, dNBR 3 e alta, dNBR 4, ao longo de 3 anos consecutivos.

Este índice foi retirado do USGS “Science for a changing world” para os anos de 2012, 2013 e 2014, sempre com imagens *LANDSAT_7* obtidas no mês de agosto e com recurso ao *software* ArcGis 10.2. A análise da evolução das áreas com diferentes classes dNBR é expressa no Quadro 6.6 e permite a quantificação da recuperação da área ardida entre agosto

de 2012 e agosto de 2014. É de notar que o ano de 2012 foi o ano em que ocorreu o incêndio na bacia hidrográfica da Ribeira Alportel.

Quadro 6.6 – Caracterização da recuperação da área ardida no incêndio de Catraia, ocorrido de julho de 2012

	Ano	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
Área ardida (km ²)		34.18	9.94	5.12	33.25	2.66
Área ardida (%)		45.00	61.10	8.20	83.10	9.70
Área dNBR 1		4.97	0.63	1.86	4.48	0.85
Área dNBR 2	(km ²) 2012	10.65	2.76	1.70	13.83	0.99
Área dNBR 3		17.41	6.40	1.40	14.58	0.74
Área dNBR 4		1.16	0.19	0.058	0.46	0.00
Área dNBR 1		22.94	6.99	3.76	28.31	2.22
Área dNBR 2	(km ²) 2013	8.64	2.59	0.96	4.25	0.25
Área dNBR 3		2.65	0.39	0.29	0.79	0.02
Área dNBR 4		0.006	-	0.001	-	-
Área dNBR 1		23.90	6.70	3.82	27.79	2.05
Área dNBR 2	(km ²) 2014	9.33	2.97	1.05	5.25	0.40
Área dNBR 3		1.03	0.31	0.15	0.31	0.04
Área dNBR 4		-	-	-	-	-

Através da análise do Quadro 6.6 é possível verificar que as bacias hidrográficas com maior percentagem de área ardida são MJudeu, seguida da Alportel 2 e Alportel1. É de notar também que existe uma recuperação, ao longo dos anos, verificando-se que a área de dNBR 1 aumenta com o tempo, diminuindo a área dNBR3 e dNBR4, o que demonstra assim a evolução do coberto vegetal. Constatase que no ano de 2014 não existe área classificada com severidade alta (dNBR 4).

Nas figuras seguintes é possível observar os vários valores obtidos de NDBR, relativos aos anos mencionados anteriormente e verificar a evolução que ocorreu, nos anos seguintes ao incêndio.

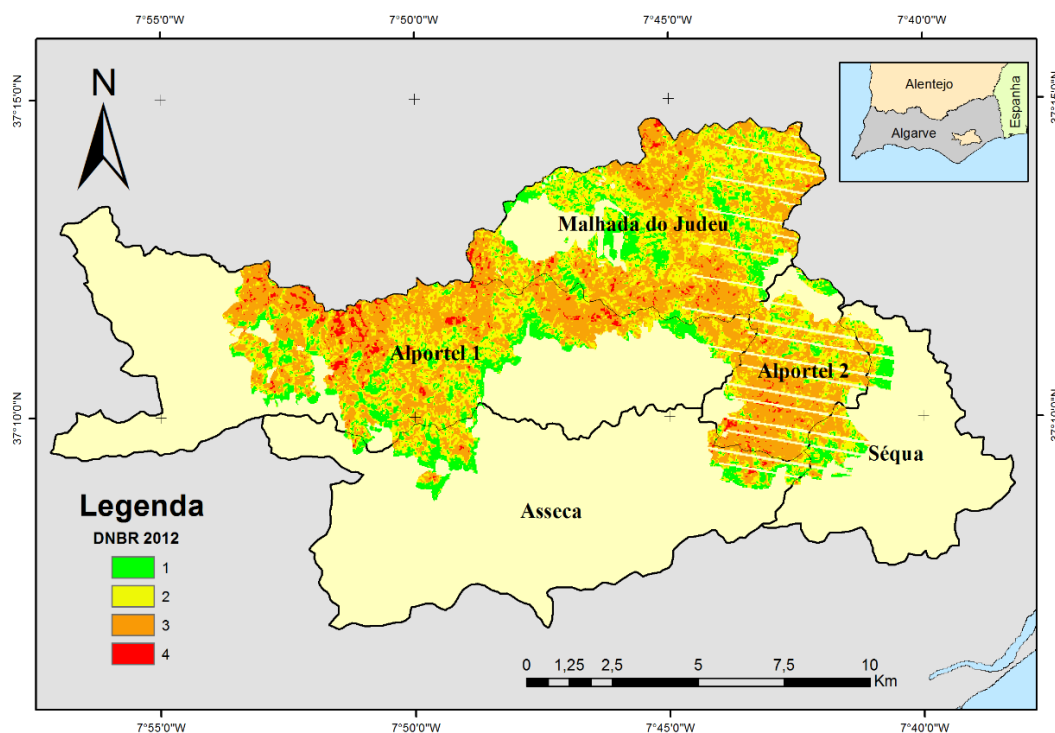


Fig.6.8 – Mapa do índice *difference Normalized Burn Ratio* (dnBR) obtido em 2012 na área afetada pelo Incêndio de Catraia

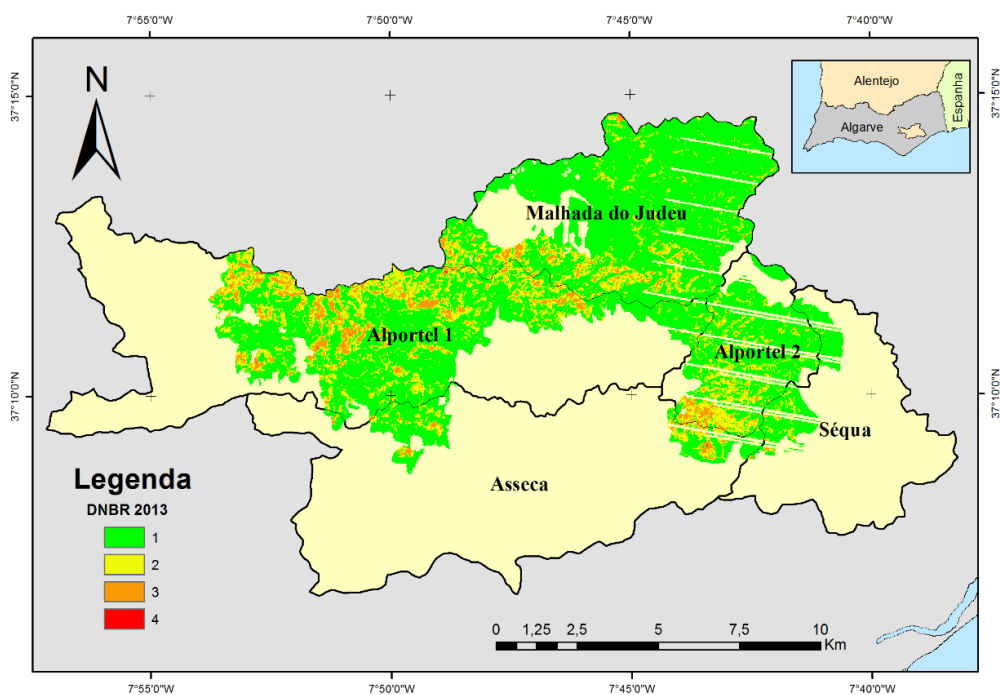


Fig.6.9 – Mapa do índice *difference Normalized Burn Ratio* (dnBR) obtido em 2013 na área afetada pelo Incêndio de Catraia

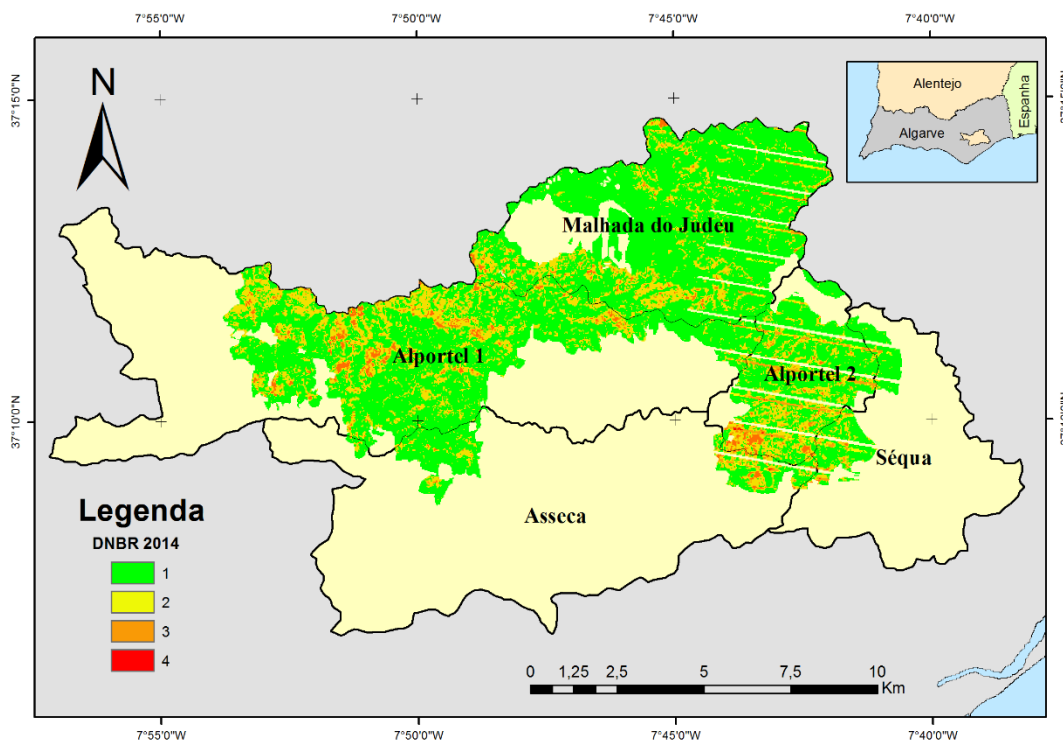


Fig.6.10 – Mapa do índice *difference Normalized Burn Ratio* (dNBR) obtido em 2014 na área afetada pelo Incêndio de Catraia

6.1.7 ÍNDICE NDVI

O índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) foi calculado a partir de imagens *LANDSAT_7* e com recurso ao *software ArcGis 10.2.*, tendo em conta o valor da biomassa calculado, através das expressões 6.1 e 6.2, bem como, a quantidade de sobreiros e arbustos existentes no local em questão.

A figura seguinte mostra o índice NDVI obtido para a bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel:

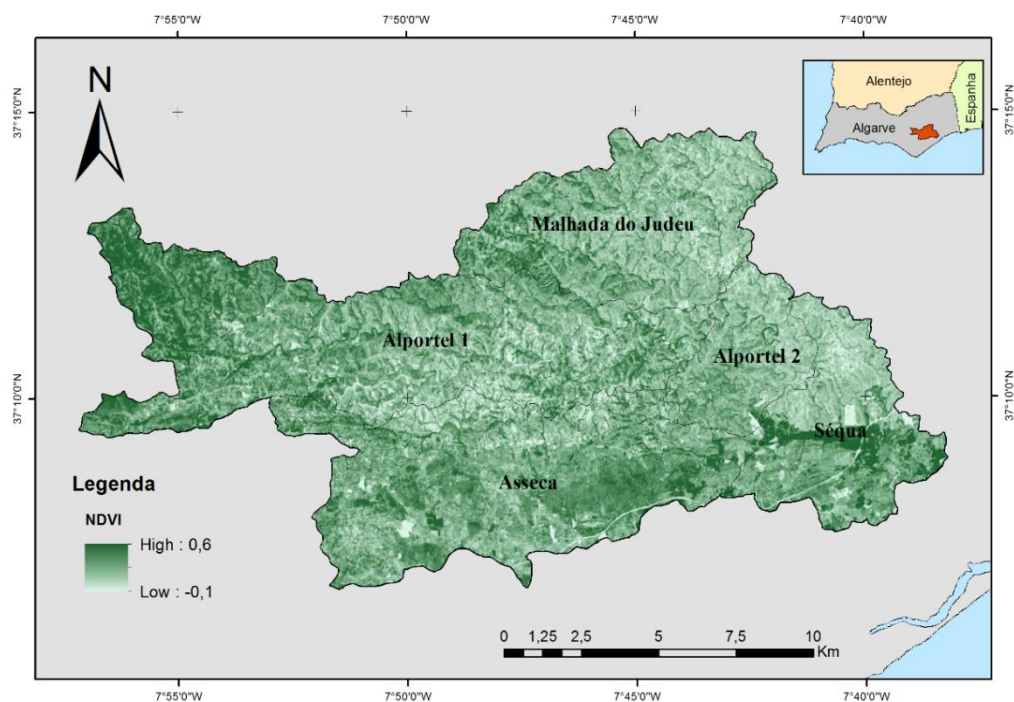


Fig.6.11 – Índice NDVI, da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel

6.1.8 BIOMASSA

A estimativa da biomassa, neste trabalho, teve início na realização de uma ida ao campo, ao local da bacia hidrográfica em questão, identificando-se 7 zonas distintas com árvores e arbustos, nas quais se mediu a sua altura e diâmetro médios.

No Quadro que se segue é possível observar os valores das medições realizadas em campo, bem como das respetivas coordenadas:

Quadro 6.7 – Medições realizadas no campo para a biomassa e respetivas coordenadas

Conjunto	Dimensões	Sobreiro	Arbusto	Coordenadas
1	Altura (m)	9	4	N 37°09.023`
	Diâmetro (cm)	23	5	H007°44.013`
2	Altura (m)	14	2	N 37°09.151`
	Diâmetro (cm)	26	3	H007°42.807`
3	Altura (m)	8	3	N 37°09.083`
	Diâmetro (cm)	37	6	H007°41.970`
4	Altura (m)	11	2.2	N 37°11.145`
	Diâmetro (cm)	27	3	H007°54.868`
5	Altura (m)	8	2	N 37°12.026`
	Diâmetro (cm)	31	3	H007°55.562`
6	Altura (m)	7	2	N 37°11.038`
	Diâmetro (cm)	27	3	H007°55.202`
7	Altura (m)	8	2	N 37°10.480`
	Diâmetro (cm)	25	3	H007°53.808`

Seguidamente realizou-se uma contagem de número de árvores e arbustos das 7 áreas dos vários locais em questão, sendo essa contagem feita através de fotografias aéreas, a partir das quais se elaborou uma estimativa do número de árvores e do número de arbustos.

Realizada uma estimativa desta contagem, passou-se então ao cálculo da biomassa do arbusto e do sobreiro, através das expressões que se seguem, sendo as mesmas baseadas, respetivamente em Pereira *et al.* (1995) e Florete *et al.* (1988):

$$Biomassa\ Arbusto = 0.642 \cdot H^{0.0075} \cdot D_{max}^{2.4901} \cdot 166.67 \quad (6.1)$$

$$Biomassa\ Sobreiro = -16.6845 + 0.65729 \cdot d^2 \cdot H \quad (6.2)$$

Sendo d , o diâmetro do tronco, em cm e H a altura de copa, em cm.

Apresenta-se o quadro com os resultados finais, obtidos através das expressões anteriores, para os arbustos e para os sobreiros, bem como a quantidade de sobreiros e de arbustos calculadas, após a observação das fotografias aéreas:

Quadro 6.8 – Valores obtidos para a biomassa do sobreiro e do arbusto e suas quantidades

Conjunto	Biomassa Sobreiro (g)	Biomassa Arbusto (g)	Biomassa total de Sobreiros (kg)	Biomassa total de Arbustos (kg)	NDVI
1	312919.08	0.062	2503.35	225	0.267
2	622042.57	0.017	126.91	0	0.204
3	719847.32	0.098	2879.39	0	0.200
4	527064.17	0.017	5797.71	250	0.385
5	505307.87	0.017	5558.39	1389	0.357
6	335398.40	0.017	335.40	830	0.163
7	328628.32	0.017	985.88	1667	0.346

O conhecimento dos valores de NDVI, em cada uma das zonas em que foi realizada a estimativa da biomassa acima do solo, possibilitou a calibração de uma curva de correlação entre o NDVI e a biomassa acima do solo. A Figura 6.12 mostra a relação existente entre o NDVI e a biomassa total, sendo esta última, resultante da soma da biomassa dos arbustos com a biomassa dos sobreiros:

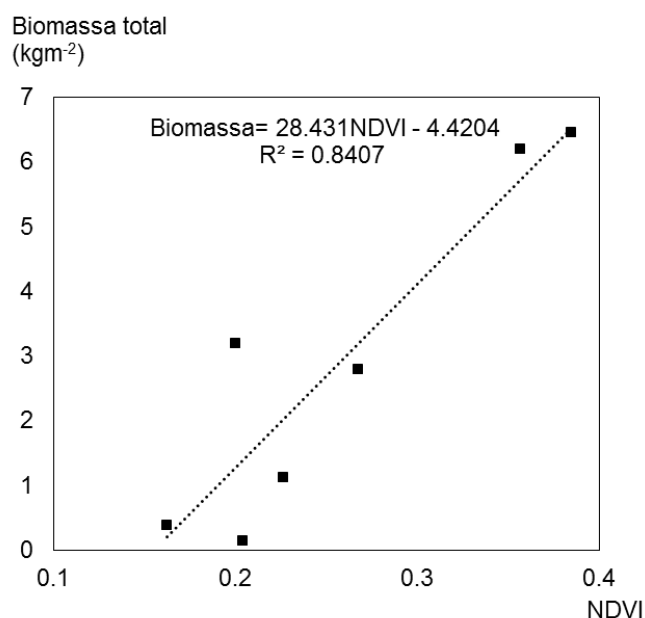


Fig.6.12 – Curva de relacionamento entre o NDVI e a Biomassa total

A Figura que se segue representa o mapa de biomassa total, para as cinco sub-bacias, gerado a partir do *software* ArcGIS:

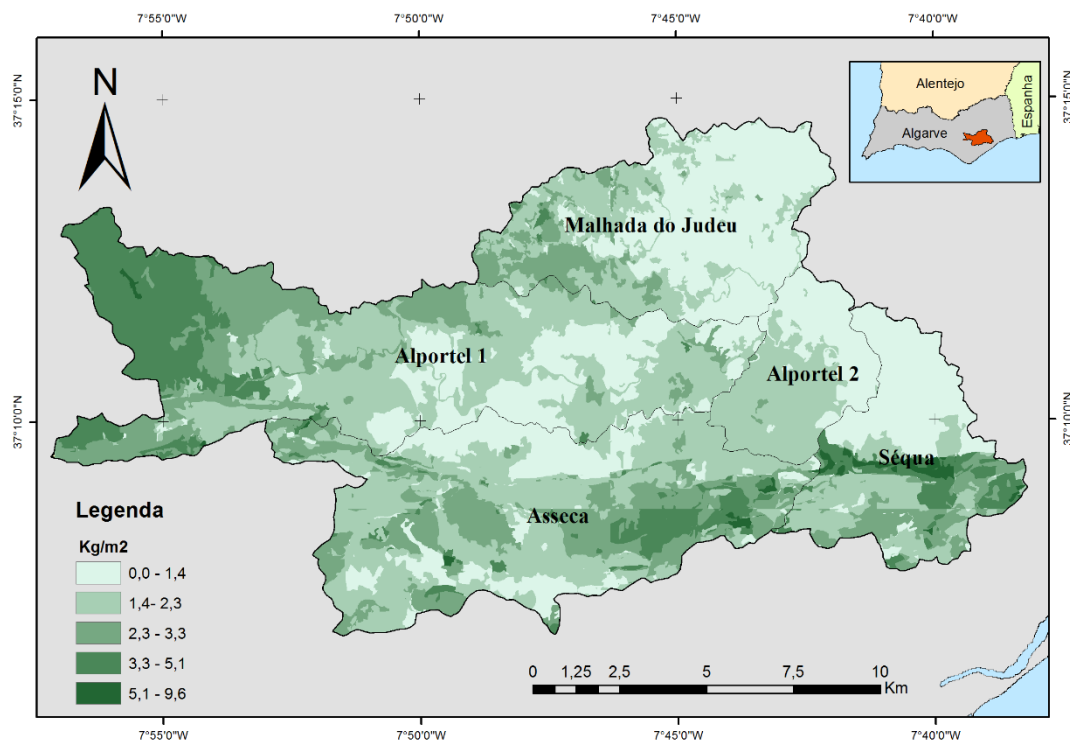


Fig.6.13 – Biomassa, referente à bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel

6.1.9. REDE HIDROGRÁFICA DA BACIA

A rede hidrográfica da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel, obtida através da carta militar de Portugal à escala 1:25000, pode ser observada na Figura 6.14:



Fig.6.14 – Rede hidrográfica da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel

Calculados todos os parâmetros mencionados anteriormente, passou-se ao cálculo dos parâmetros descritivos de cada sub-bacia. O quadro que se segue mostra os parâmetros descritivos de cada sub-bacia, bem como da linha de água principal da bacia hidrográfica, sendo a mesma composta pelas sub-bacias, Alportel 1, Alportel 2 e Séqua:

Quadro 6.9 – Parâmetros descritivos da linha de água principal da bacia hidrográfica

Sub-bacia	Altitude máxima (m)	Comprimento da linha de água principal (km)	Declive médio- l (mm^{-1})	Declividade equivalente constante- S_3 (kmkm^{-1})	T_c (h)*
Linha de água principal	500	56.41	0.059	0.0053	11.11
Alportel1	500	39.09	0.089	0.0074	7.37
MJudeu	450	13.40	0.042	0.0169	2.35
ASeca	330	22.09	0.012	0.0102	4.19
Alportel2	60	9.54	0.005	0.0041	3.12
Séqua	20	7.78	0.004	0.0021	3.47

* Calculado pelo método de Kirpich, in Lencastre e Franco (1992)

Com base na carta milita de Portugal, foram elaborados os perfis longitudinais para cada uma das cinco sub-bacias. A Figura 6.15 apresenta os 5 perfis, sendo que todos estão representados no mesmo referencial de distância à foz do Gilão.

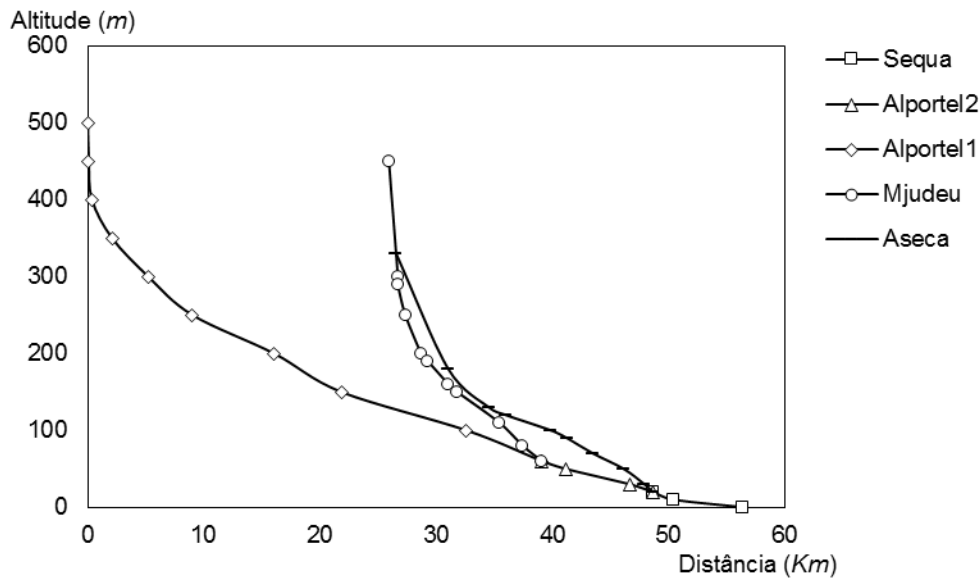


Fig.6.15 – Perfil longitudinal das 5 sub-bacias

Verifica-se que a declividade equivalente constante, para as linhas de água, é de aproximadamente 5%, sendo que o declive chega a atingir 8.9% nos troços de cabeceira. Como quase todas as linhas de água que nascem na serra e desaguam na costa Sul do Algarve, apresentam regime torrencial com caudais nulos ou muito reduzidos durante a maior parte do ano. Na zona de Serra, os leitos dos cursos de água, são rochosos e as vertentes são muito inclinadas. Na área do Barrocal os vales são de fundo largo, com vertentes de declive acentuado. No litoral os leitos e as margens têm declives suaves.

6.2. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

6.2.1. HEC-HMS

No presente estudo a bacia hidrográfica do Rio Séqua foi modelada, com recurso ao *software Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Foram utilizados os métodos: Curva Número com fatores de correção para atender ao efeito dos incêndios florestais no cálculo da relação entre a precipitação e a precipitação efetiva; método do hidrograma unitário do *Soil Conservation Service (SCS)* para a transformação de precipitação em escoamento e método da onda cinemática para o cálculo do escoamento em regime variável nos troços de canal.

6.2.2. MODELO HIDROLÓGICO

Tal como referido anteriormente, a criação do modelo hidrológico foi realizada com recurso ao *software HEC-HMS*, onde foram aplicados os métodos: Curva Número corrigido para atender ao efeito dos incêndios florestais no cálculo da relação entre a precipitação e a precipitação efetiva; método do hidrograma unitário do *SCS* para a transformação de

precipitação em escoamento superficial e método da onda cinemática para o cálculo do escoamento em regime variável nos troços de canal.

A modelação da presente bacia hidrográfica foi realizada, tendo em conta a descrição física de cada sub-bacia, referida neste documento, bem como o modelo meteorológico, que simula as condições atmosféricas existentes à superfície terrestre da bacia e as especificações de controlo, que caracterizam o início e o final da simulação. A simulação dos troços de rio existentes, na presente bacia hidrográfica, foi realizada através da criação de canais e de confluências.

Procedeu-se então à criação das cinco sub-bacias, de dois troços de rio e respetivas ligações, respeitando a topologia da bacia hidrográfica, como se pode observar na Figura 6.16:

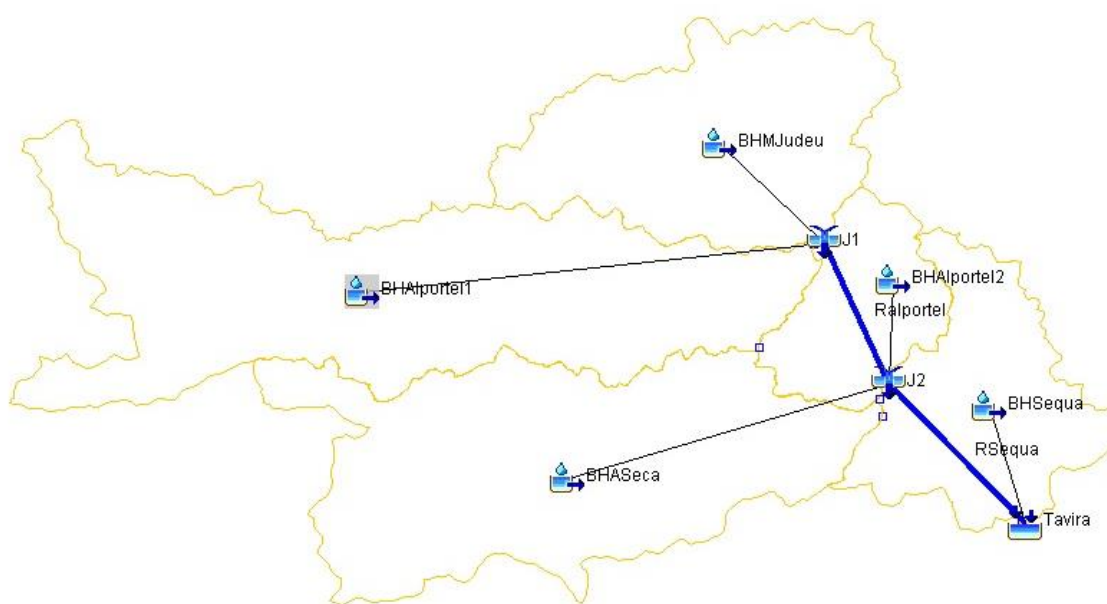


Fig.6.16 – Modelo Hidrológico da bacia hidrográfica do Séqua no HEC-HMS

Através da Figura 6.18, é possível identificar a existência de dois troços de rio, pertencentes à bacia hidrográfica em questão, “RAIportel” e “RSéqua”. As características dos mesmos são apresentadas no Quadro 6.10:

Quadro 6.10 – Características dos troços de rio, da bacia hidrográfica do Alportel

Troços de rio	Comprimento (m)	Declive	Coefficiente de Manning Strickler	Largura (m)	Inclinação da margem	Secção
RAIportel	8475	0.004	0.035	25	1:1	Trapezoidal
RSéqua	5885	0.002	0.04	250		

6.2.3. PARÂMETROS PARA A MODELAÇÃO

Para a modelação em questão foi necessário o cálculo do tempo de concentração, T_c , para cada uma das cinco sub-bacias. O tempo de concentração traduz-se como o tempo que uma gota de chuva demora a deslocar-se desde o ponto hidrologicamente mais afastado da bacia até à saída, ou secção de controlo, da mesma.

O cálculo deste parâmetro foi elaborado tendo em conta a fórmula empírica de Kirpich, permitindo assim ter um ordem de grandeza do tempo de concentração da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel.

Assim sendo, pela fórmula de Kirpich, *in* Lencastre e Franco (1992), temos que:

$$T_c = 0.39 \cdot \left(\frac{\sum L^2}{S_3} \right)^{0.385} \quad (6.3.)$$

sendo T_c , o tempo de concentração em horas, L o comprimento da linha de água principal da sub bacia, em Km, e S_3 a declividade equivalente constante da sub bacia, em %.

O quadro que se segue mostra os valores obtidos, do tempo de concentração, para cada sub-bacia, pelo método descrito, anteriormente:

Quadro 6.11 – Tempo de concentração para cada sub-bacia

Sub bacia	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
T_c Kirpich (h)	7.37	3.12	4.19	2.35	3.47

Através do tempo de concentração, é possível calcular o Lag Time, de cada sub-bacia, sendo este um parâmetro resultante da multiplicação do tempo de concentração, pelo valor 0.6, segundo Lencastre e Franco (1992). Assim sendo, apresenta-se de seguida, o quadro, com os valores do *Lag Time*, aplicados, no respetivo *software*, a cada sub-bacia:

Quadro 6.12 – *Lag Time* aplicado a cada sub-bacia

Sub bacia	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
<i>Lag Time</i> (min)	265.5	112.19	151	84.64	125.04

A determinação dos valores de *CN* foi realizada na bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel, para cada sub-bacia, através da realização de uma média ponderada da área de cada polígono, resultante da interseção das áreas das cinco sub-bacias com os respetivos tipos de

solos e usos do solo. Assim sendo, tempo em conta o grupo hidrológico de cada polígono resultante da interseção, chegou-se ao respetivo valor de $CN_{pré-incêndio}$.

Uma vez obtidos os valores de $CN_{pré-incêndio}$ e, tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, para os solos do ludo e para os solos da serra, passou-se então por calcular os fatores de correção a aplicar à bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel, em função da massa, K_{CN} . Esta análise foi feita aplicando as equações 5.20 e 5.21, do presente trabalho, através das quais se obtiveram os valores de CN para as várias classes texturais do solo. Estabelecendo o fator $K_{CN} = CN_{pós-incêndio}/CN_{pré-incêndio}$, foi possível obter K_{CN} em função dos valores de massa, m , de 0 Kg/m², 4 Kg/m², 8 Kg/m² e 16 Kg/m², para as diferentes classes texturais de solo, a aplicar a cada sub-bacia.

Tal como referido para o modelo hidrológico da bacia hidrográfica criado no HEC-HMS, foram criados diversos cenários. Para o método da Curva Número foi necessário adotar os parâmetros correspondentes, de acordo com a bibliografia, apresentados no quadro 5.4 do capítulo 5, do presente trabalho. Para atender ao efeito do incêndio, considera-se que a intensidade do mesmo depende do material combustível disponível, constituído pela biomassa acima do solo, m . Deste modo, tal como referido anteriormente, os fatores de correção K_{CN} , apresentados na Figura 5.6, do presente trabalho, dependem do tipo de solo e de m .

6.2.4. PRECIPITAÇÃO

Foram considerados dois hietogramas, calculados de acordo com as curvas de possibilidade udométrica preconizadas no Decreto Regulamentar 23/95 de 23 de agosto (Tabela 9), um para o período de retorno, $Tr_{10} = 10$ anos e o segundo para $Tr_{100} = 100$ anos.

O cálculo dos hietogramas foi realizado com aplicação do método dos blocos alternados (Chow *et al.* 1988). Neste método calculam-se as intensidades médias em intervalos de tempo $Tc/5$, sendo $Tc =$ período de retorno da bacia hidrográfica. Estas intensidades são transformadas em alturas de precipitação. Posteriormente, são calculadas e rearranjadas as precipitações incrementais, de modo a que o valor mais elevado se localize no centro do hietograma, sendo os restantes valores dispostos por ordem decrescente, alternadamente, um à direita e outro à esquerda, do bloco central.

Quadro 6.13 – Curvas de possibilidade udométrica de acordo com o DR. n.º 23/95 de 23 de Agosto

$Tr=10$ anos	$Tr=100$ anos
$P=30.7.t^{0.451}$	$P=45.7.t^{0.492}$

De seguida, apresentam-se os gráficos que traduzem os valores de precipitação incremental obtidos, para os respetivos tempos de retorno:

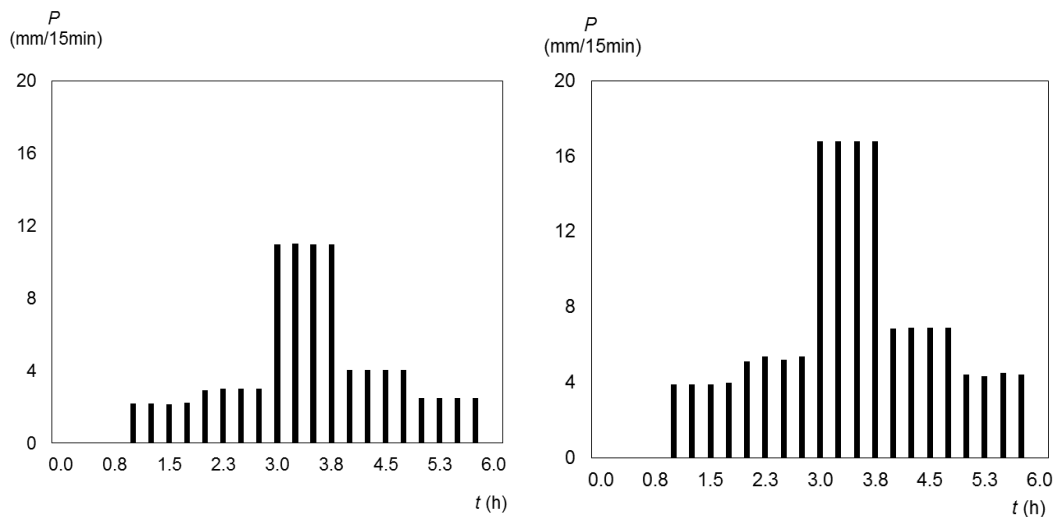


Fig.6.17 – Hietograma para: a) $T_r=10$ anos; b) $T_r=100$ anos

6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na modelação hidrológica foram considerados quatro cenários, o cenário pré-incêndio e os cenários pós-incêndio de Catraia em 2012, 2013 e 2014. Para todos os cenários foram consideradas as precipitações associadas aos períodos de retorno de 10 e 100 anos, dando origem a 8 séries de resultados. O cálculo de CN nas zonas áridas foi realizado com base no critério de Higginson e Jarnecke (2007) e a severidade do incêndio foi determinada de acordo com o índice dNBR.

6.3.1. CENÁRIO PRÉ-INCÊNDIO

Relativamente a este cenário, ele traduz o modelo de referência da bacia hidrográfica do Rio Séqua, estando este isento do efeito do incêndio. Através deste modelo será possível realizar uma comparação entre a bacia hidrográfica afetada pelo incêndio e a mesma bacia não afetada e assim concluir quais as diferenças e implicações que as mesmas envolvem.

Os valores base de CN , aplicados neste cenário, para cada sub-bacia, encontram-se no seguinte quadro:

Quadro 6.14 – Valores de CN aplicados ao cenário pré-incêndio

Sub bacia	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
CN	91.22	94.34	91.56	93.31	93.06

De seguida, apresentam-se os gráficos que traduzem os resultados obtidos, pelo método da Curva Número, relativos ao escoamento superficial, em função do tempo, para os dois tempos de retorno:

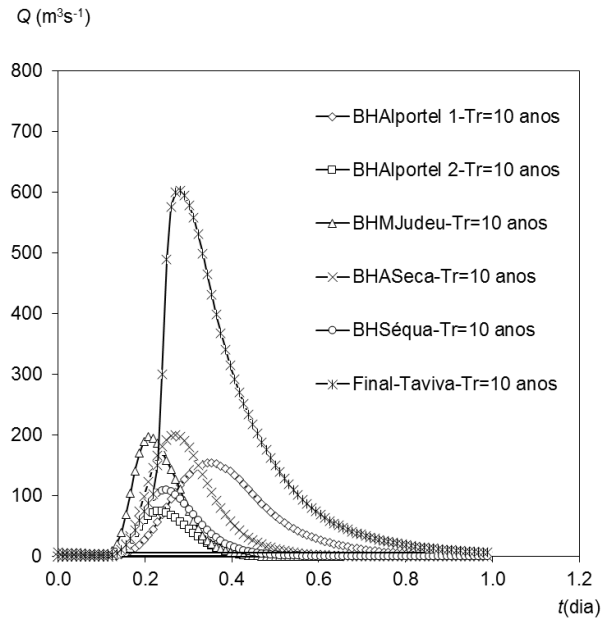


Fig.6.18 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pré-incêndio, em agosto de 2012, para $Tr=10$ anos

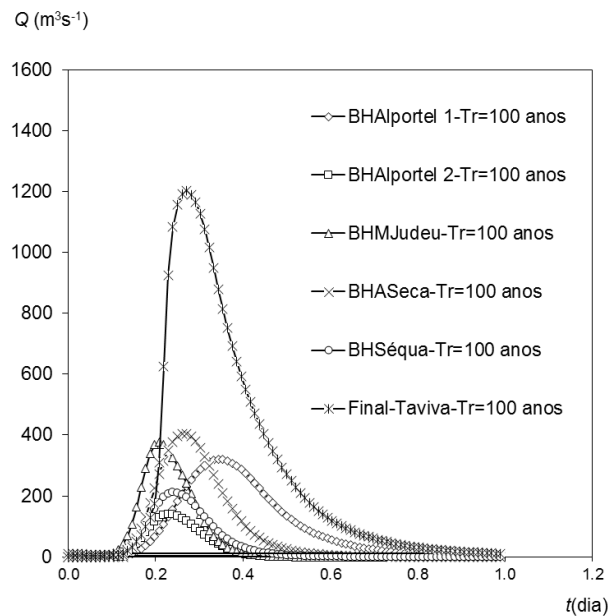


Fig.6.19 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pré-incêndio, em agosto de 2012, para $Tr=100$ anos

6.3.2. CENÁRIO PÓS-INCÊNDIO

No que diz respeito a este cenário, ele é referente à parte da bacia hidrográfica da Ribeira do Alportel, que foi afetada pelo incêndio de 2012. Estes cenários foram realizados tendo em conta um conjunto de regras, propostos por Higginson e Jarnecke (2007), mencionadas no quadro 5.7, do capítulo 5, do presente trabalho.

6.3.2.1. Cenário pós incêndio em Agosto de 2012

Os valores base de *CN*, aplicados neste cenário, para cada sub-bacia, encontram-se no seguinte quadro:

Quadro 6.15 – Valores de *CN* aplicados ao cenário pós-incêndio-2012

Sub bacia	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
<i>CN</i>	89.59	95.50	87.98	93.26	90.33

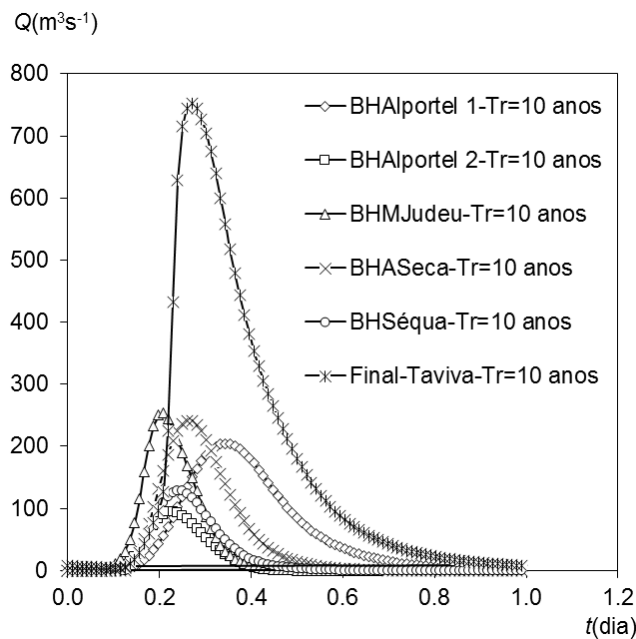


Fig.6.20 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2012, para $T_r=10$ anos

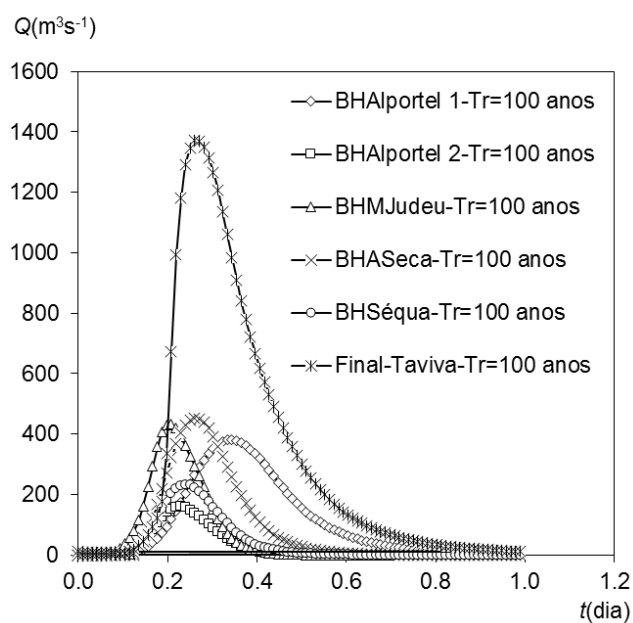


Fig.6.21 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2012, para $Tr=100$ anos

6.3.2.2. Cenário pós incêndio em Agosto de 2013

Os valores base de CN , aplicados neste cenário, para cada sub-bacia, encontram-se no seguinte quadro:

Quadro 6.16 – Valores de CN aplicados ao cenário pós-incêndio-2013

Sub bacia	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
CN	85.46	90.77	85.29	88.73	87.24

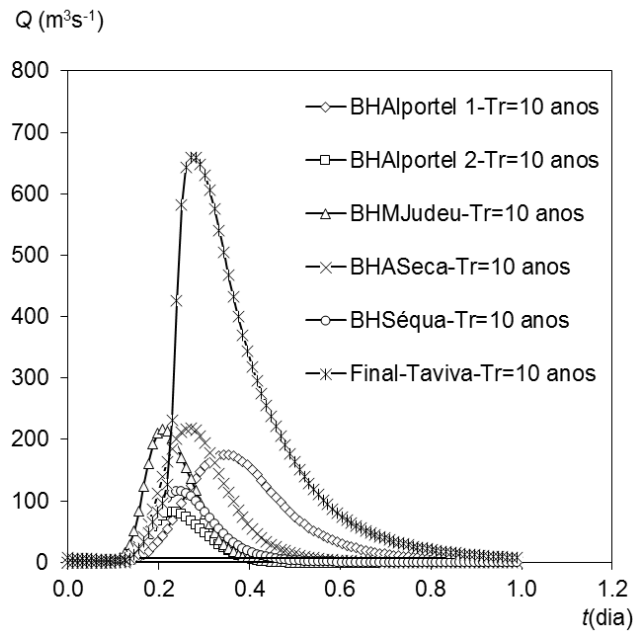


Fig.6.22 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2013, para $Tr=10$ anos

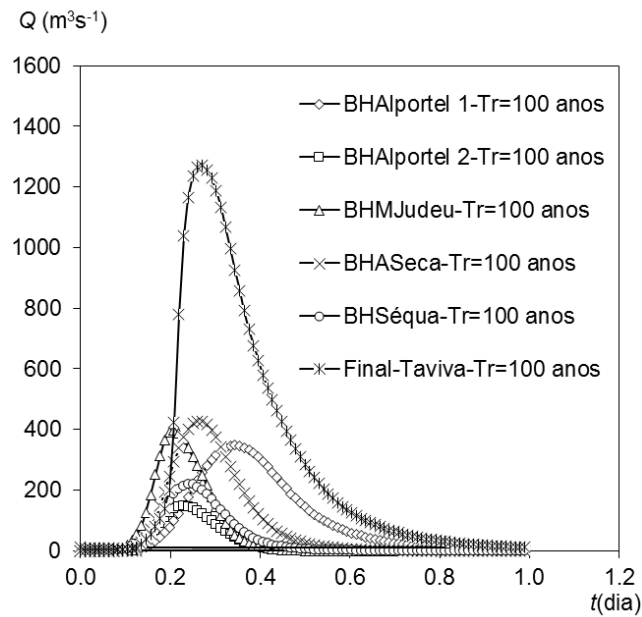


Fig.6.23 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2013, para $Tr=100$ anos

6.3.2.3. Cenário pós incêndio em Agosto de 2014

Os valores base de CN , aplicados neste cenário, para cada sub-bacia, encontram-se no seguinte quadro:

Quadro 6.17 – Valores de CN aplicados ao cenário pós-incêndio-2014

Sub bacia	Alportel1	Alportel2	ASeca	MJudeu	Séqua
CN	85.19	90.97	85.25	88.80	87.75

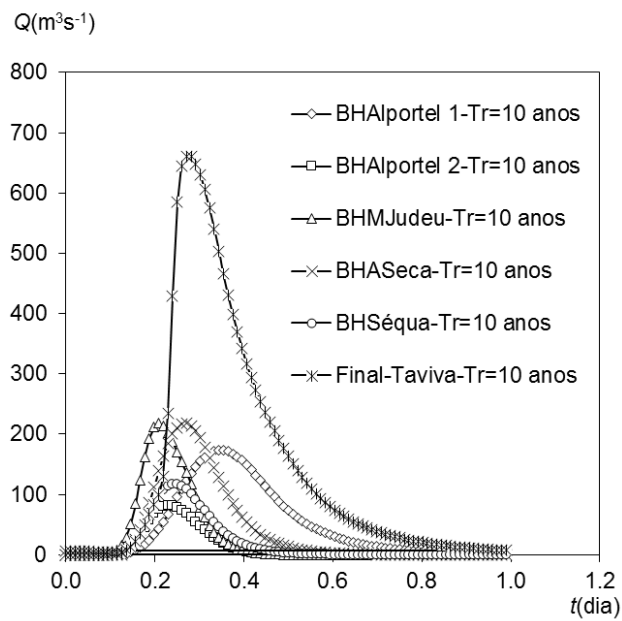


Fig.6.24 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2014, para $Tr=10$ anos

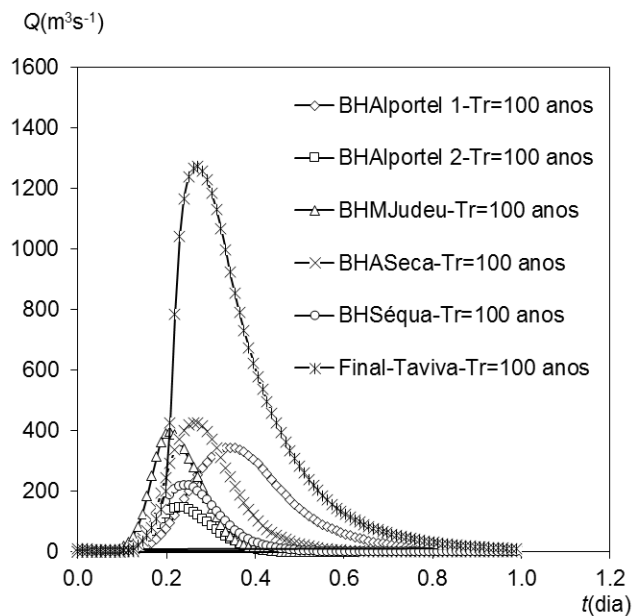


Fig.6.25 – Escoamento obtido para as cinco sub-bacias, no cenário pós-incêndio, em agosto de 2014, para $Tr=100$ anos

Através da análise das Figuras 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24 e 6.25, é possível observar que o após o incêndio de Catraia, no Rio Gilão, Tavira, existe um incremento do caudal de ponta de cheia para Tr_{100} de 14 % e para Tr_{10} de 25% face ao cenário pré-incêndio. Em 2013 este aumento reduz para 6% com Tr_{100} e 10% com Tr_{10} , enquanto em 2014 o aumento mantém-se praticamente constante face ao ano anterior.

As sub-bacias hidrográficas que mais contribuem para estas diferenças são Alportel2, MJudeu e Alportel1, verificando-se um aumento do caudal de ponta de cheia, face ao cenário pré-incêndio para Tr_{100} em 2012, de 15 %, 15 % e 20 % respetivamente. Em 2013, para também para Tr_{100} , o incremento de caudal esperado nestas sub-bacias hidrográficas é de 6%, 6% e 8% respetivamente. Em 2014, os valores permanecem praticamente constantes face ao ano anterior.

Para Tr_{10} , nas sub-bacias hidrográficas Alportel2, MJudeu e Alportel1, o aumento do caudal de ponta de cheia face ao cenário pré-incêndio em 2012 é de 28%, 28% e 33% respetivamente. Em 2013, para Tr_{10} , o incremento de caudal esperado nestas sub-bacias hidrográficas é de 10%, 10% e 14% respetivamente. Em 2014, os valores permanecem praticamente constantes face ao ano anterior.

É de notar que nas sub-bacias hidrográficas mais afetadas pelo incêndio, durante o primeiro ano, a taxa de recuperação hidrológica é elevada, reduzindo bastante durante o segundo ano.

As sub-bacias hidrográficas Asseca e Séqua praticamente não foram afetadas pelo incêndio de Catraia, pelo que os caudais permanecem quase constantes nos cenários estudados, contribuindo para que o efeito do incêndio de Catraia nos hidrogramas de cheia na cidade de Tavira seja atenuado.

É possível concluir então, que o escoamento superficial aumenta, quando passamos do cenário pré-incêndio, para o cenário pós-incêndio, aumento este que é notado devido à presença de cinzas. Quanto maior for a área afetada pelo incêndio, menor será a infiltração de água no solo e, por conseguinte, maior será o escoamento superficial originado pela precipitação.

7. EFEITO DA EROSÃO LOCALIZADA NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PONTES

7.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo apresenta-se a análise hidráulica e estrutural de uma ponte em betão armado, a fim de se determinar o efeito da erosão localizada junto de um pilar nas condições de fundação, distribuição de esforços e modos de vibração.

Primeiramente, foi realizada uma análise aos elementos estruturais da ponte, sob as ações de sobrecarga, a ação do vento e a ação do sismo através de um programa de cálculo designado SAP2000, v17. As análises do comportamento estrutural foram realizadas em 3 cenários distintos, 1) considerando que não existe desenvolvimento de erosão localizada, 2) considerando que existe desenvolvimento de erosão localizada após uma cheia centenária pré-incêndio e finalmente 3) considerando que existe desenvolvimento de cavidade de erosão causada por uma cheia pós-incêndio.

7.2. ESTRUTURA EM ANÁLISE

7.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura da ponte é composta por dois pilares e um tabuleiro tipo caixão com uma faixa de rodagem em cada sentido. A maior altura, desde o nível do solo à superfície da ponte é de 10m, o tabuleiro tem 88.6m de comprimento e 8.5m de largura. Os pilares possuem secções transversais circulares, sendo as respetivas sapatas retangulares, com dimensões de 5.50x4.50 m.

O modelo estrutural adotado é tridimensional, composto por elementos estruturais, tais como, lajes, pilares e sapatas, discretizadas em elementos finitos de laje em todos os elementos exceto nos pilares, onde foram considerados elementos finitos de barra, em todos os casos, um comportamento elástico linear foi considerado. O sentido de distribuição das cargas ao nível dos elementos estruturais é efetuado das lajes/viga em caixão para os pilares, dos pilares para as sapatas e destas últimas para o solo.

Na Figura 7.1 é possível observar o perfil longitudinal da estrutura, enquanto na Figura 7.2 se identifica o pormenor de um pilar e de uma sapata.

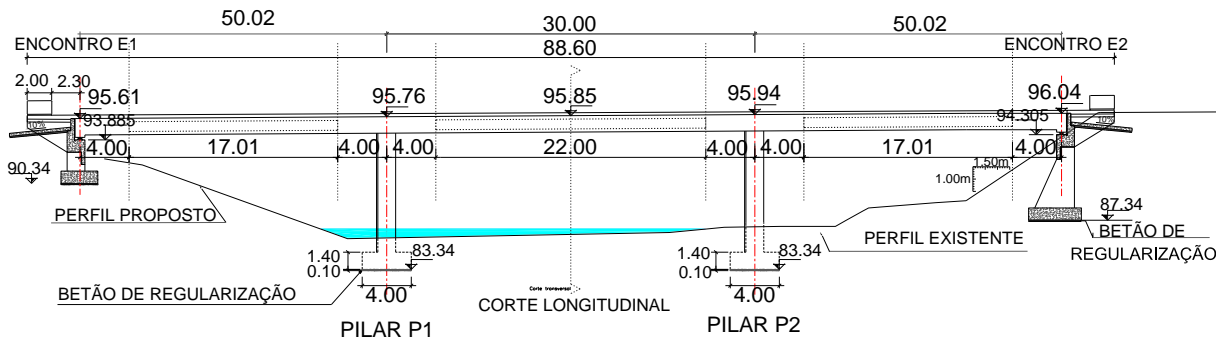


Fig.7.1 – Corte longitudinal da estrutura a analisar

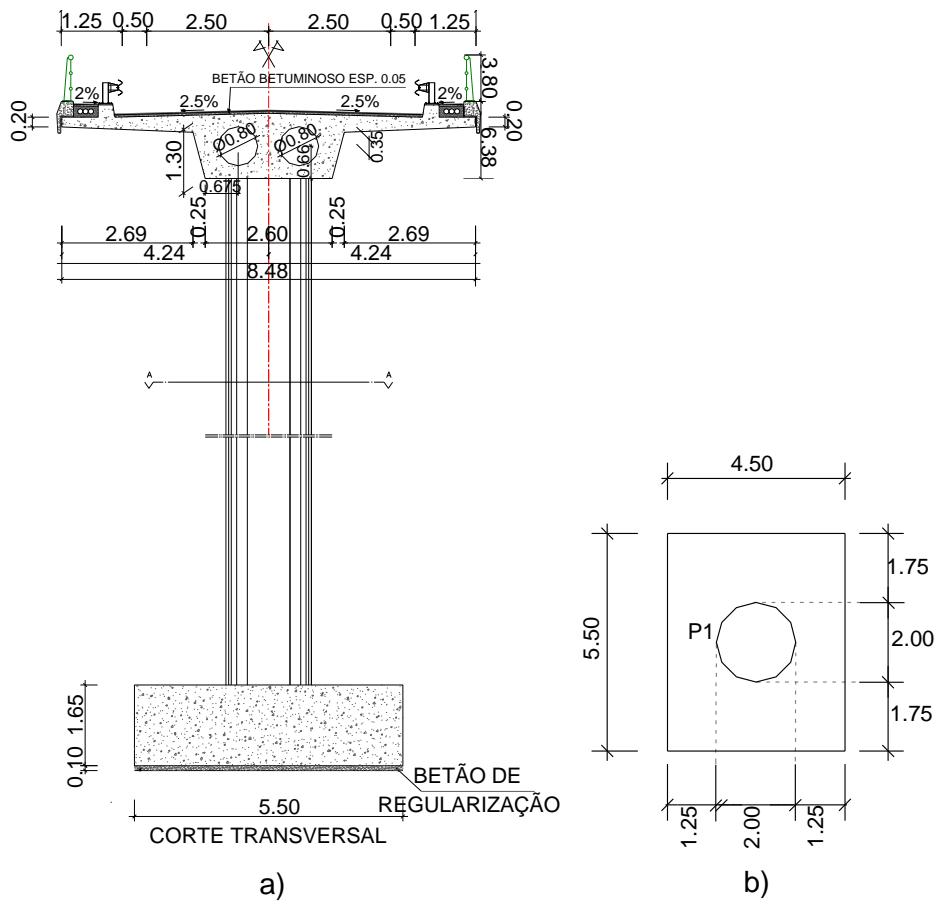


Fig.7.2 – Secção transversal: a) Sapata, pilar e tabuleiro da estrutura; b) Fundação e pilar da estrutura

A estrutura foi dimensionada e calculada de acordo com a NP EN 1990, NP EN 1991-1-1, NP EN 1991-1-4, EN 1991-2, NP EN 1992-1-1 e EN 1998-2.

7.2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS

Nas lajes, vigas, pilares, sapatas e vigas de fundação foi utilizado um betão da classe C45/55 e aço com a classe de resistência A500 NR.

7.3. AÇÕES ATUANTES SOBRE A ESTRUTURA

As ações que atuam sobre a estrutura da ponte foram quantificadas de acordo com a norma NP EN 1991-1-1, NP EN 1991-1-4, EN 1991-2 e EN 1998-2. Todos os elementos estruturais de betão armado têm um valor de peso específico, γ_c de 25kNm^{-3} .

As ações consideradas são a sobrecarga, a ação do vento e a ação sísmica.

7.3.1. SOBRECARGA

Tendo em conta que se trata de uma ponte, definiu-se uma sobrecarga de 9.0 kNm^{-2} , ao centro de uma das faixas de rodagem do tabuleiro, de modo a simular-se a torção e de 2.5 kNm^{-2} , na restante largura do tabuleiro.

No Quadro 7.1 é possível verificar os valores da sobrecarga aplicada à estrutura:

Quadro 7.1 – Sobrecargas aplicadas na estrutura, de acordo com a tabela 4.2 do EN 1991-2

Descrição	Sobrecarga (kNm^{-2})
Faixa de rodagem	9.0
Bermas	2.5

7.3.2. AÇÃO DO VENTO

A ação do vento foi considerada no dimensionamento, de acordo com a NP EN 1991-1-4, na direção perpendicular ao comprimento da ponte e apenas numa direção. A análise foi realizada tendo em conta a influência do vento em pontes, tendo-se em consideração que a mesma se localiza no litoral e que possui guarda-corpos não vazados.

No que diz respeito à categoria do terreno, a estrutura em análise situa-se numa zona costeira, exposta aos ventos do mar, classificando-se então o terreno como categoria I, em que, o comprimento de rugosidade, z_0 , é de 0.005m e a altura mínima, z_{min} , é de 1.0m .

No Quadro 7.2 é possível observar os valores das variáveis características da estrutura.

Quadro 7.2 – Características referentes à estrutura, de acordo com a NP EN 1991-1-4

Categoria do Terreno	Zona	Orografia	Comprimento da ponte - L (m)	Altura do tabuleiro- d (m)	Altura guarda-corpos- d_1 (m)
I	B	1.0	88.6	6.38	3.8

7.3.2.1. Ação do vento no tabuleiro da ponte

Apresentam-se, de seguida, os valores de cálculo referentes à ação do vento no tabuleiro da ponte, na direção perpendicular ao maior comprimento da mesma, direção x .

O cálculo da força F_w , na direção x , a aplicar no tabuleiro da estrutura é dada pela seguinte Equação 7.1:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \quad (7.1.)$$

sendo: massa volúmica do ar, $\rho = 1.25 \text{ kgm}^{-3}$. O valor de referência da velocidade do vento é obtido pela Equação 7.2:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (7.2.)$$

Sendo: coeficiente de direção, $c_{dir} = 1$, coeficiente de sazão, $c_{season} = 1$ e valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, dependente da zona em que a estrutura se situa.

O parâmetro C , da Equação 7.1, representa o coeficiente de força do vento e é dado pela Equação 7.3.

$$C = c_e \cdot c_{f,x} \quad (7.3.)$$

Sendo: c_e o coeficiente de exposição e $c_{f,x} = c_{fx,0}$, assumindo $c_{fx,0}$ o valor de 1.3.

A área de referência relativa à Equação 7.1 é dada por:

$$A_{ref,x} = d_{tot} \cdot L \quad (7.4.)$$

sendo L , o comprimento total da ponte e d_{tot} é dado por:

$$d_{tot} = d + 2 \cdot d_1 \quad (7.5.)$$

sendo d , a altura do tabuleiro e d_1 , a altura de cada um dos guarda-corpos.

No Quadro 7.3 é possível observar os parâmetros referentes à ação do vento a aplicar na estrutura, na direção perpendicular ao comprimento da ponte.

Quadro 7.3 – Parâmetros referentes à ação do vento no tabuleiro da ponte, de acordo com a NP EN 1991-1-4

$c_{f,x}$	$v_{b,0}$ (ms ⁻¹)	v_b	c_e	Aref (m ²)	C	F_w (kNm ⁻²)
1.3	30	30	2.7	1238.6	3.51	1.97

7.3.2.1. Ação do vento nos pilares da ponte

O cálculo da ação do vento nos pilares foi considerado, apenas na direção perpendicular ao maior comprimento da ponte, sobre a superfície dos mesmos.

O cálculo da força F_w , a aplicar na superfície dos pilares da estrutura é dada pela Equação 7.6:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot c_f \cdot A_{ref,x} \quad (7.6.)$$

sendo: a massa volúmica do ar dada por, $\rho = 1.25 \text{ kgm}^{-3}$ e encontrando-se o valor de referência da velocidade do vento, v_b , bem como os seus parâmetros, elucidados acima, na equação 7.2.

O parâmetro c_f , da Equação 7.6 é dado por:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \cdot k \quad (7.7.)$$

Sendo: $c_{f,0}$ o coeficiente de força para cilindros sem livre escoamento em torno das extremidades dado, em função do parâmetro Re , da presente norma sendo, Re , dado pela Equação 7.9:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \quad (7.8.)$$

em que b representa o diâmetro dos pilares, $v(z_e)$ a velocidade de pico do vento à altura z_e e ν a viscosidade cinemática do ar assumindo o valor de $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

O parâmetro ψ_λ , da Equação 7.7 representa o coeficiente de efeitos de extremidade, dado em função de ϕ , que representa o índice de cheios e de λ , que representa a esbelteza, fornecida na presente norma, sendo $\lambda=l/b$ e $\phi=A/A_c$, sendo A a soma das áreas projetadas dos elementos e A_c a área limitada pelo contorno exterior.

O fator k da equação 7.8 é dado de acordo com,

$$k = \frac{210 - \frac{a}{b}}{180} \quad (7.9)$$

sendo a , a distância ao eixo entre pilares.

A área de referência relativa à Equação 7.6 é dada por:

$$A_{ref} = \pi \cdot \frac{b}{2} \cdot l \quad (7.10.)$$

sendo b o diâmetro dos pilares e l a altura dos pilares.

No Quadro 7.4 apresentam-se as características referentes aos pilares da estrutura, de acordo com a norma NP EN 1991-1-4:

Quadro 7.4 – Características referentes aos pilares da estrutura, de acordo com a NP EN 1991-1-4

Altura dos pilares - l (m)	Diâmetro dos pilares - b (m)	z_e (m)	A (m ²)	A_c (m ²)	A (m)
8.52	2.00	9.2	26.69	236.51	30

Os valores finais da força do vento a aplicar nos pilares da presente estrutura são apresentados no Quadro 7.5.

Quadro 7.5 – Parâmetros referentes à ação do vento nos pilares da ponte, de acordo com a NP EN 1991-1-4

$v_{b,0}$ (ms ⁻¹)	v_b	$c_{f,0}$	Re	ψ_λ	k	A_{ref} (m ²)	c_f	F_w (kNm ⁻¹)
30	30	0.4	$4.00 \cdot 10^6$	0.98	1.08	26.77	0.425	0.75

7.3.3. AÇÃO SÍSMICA

Na análise à ação sísmica considera-se a existência de sismos Tipo 1 e Tipo 2.

Admitindo que a estrutura em análise situa-se no litoral algarvio, corresponde então às zonas sísmicas 1.3, para o sismo Tipo 1, ou sismo afastado e 2.3, para o sismo Tipo 2, ou sismo próximo, sendo a sua classe de importância do tipo III.

Considera-se que a ponte assenta em solos tipo B, segundo o Quadro 3.1 da NP EN 1998-1. Este tipo de solo é caracterizado por ser um depósito de areia muito compacta, de seixo ou de argila muito rija, com uma espessura de várias dezenas de metros, existindo este solo apenas onde a fundação assenta.

Através de um programa de cálculo gerador de espectros de Resposta fundamentado na NP EN 1998-1, designado por EC8Spec 1.04, obtiveram-se os espectros de resposta, referentes aos dois tipos de sismo, tendo em conta que a estrutura possui uma classe de ductilidade DCM, um coeficiente de comportamento, q , de 1.5 e um coeficiente de amortecimento de 5%.

No Quadro 7.6 é possível verificar os parâmetros adotados, referentes à análise sísmica:

Quadro 7.6 – Parâmetros adotados referentes à ação sísmica, segundo a NP EN 1998-1

	a_{gR} (ms^{-2})	a_g (ms^{-2})	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
Sismo Tipo 1	1.5	2.175	1.22	0.10	0.60	2.00
Sismo Tipo 2	1.7	2.175	1.22	0.10	0.25	2.00

Nas figuras que se seguem é possível observar os Espectros de Resposta obtidos, para o sismo Tipo 1 e para o sismo Tipo 2, tendo em conta os parâmetros anteriores adotados para a estrutura em causa, gerados através do programa EC8Spec 1.04.

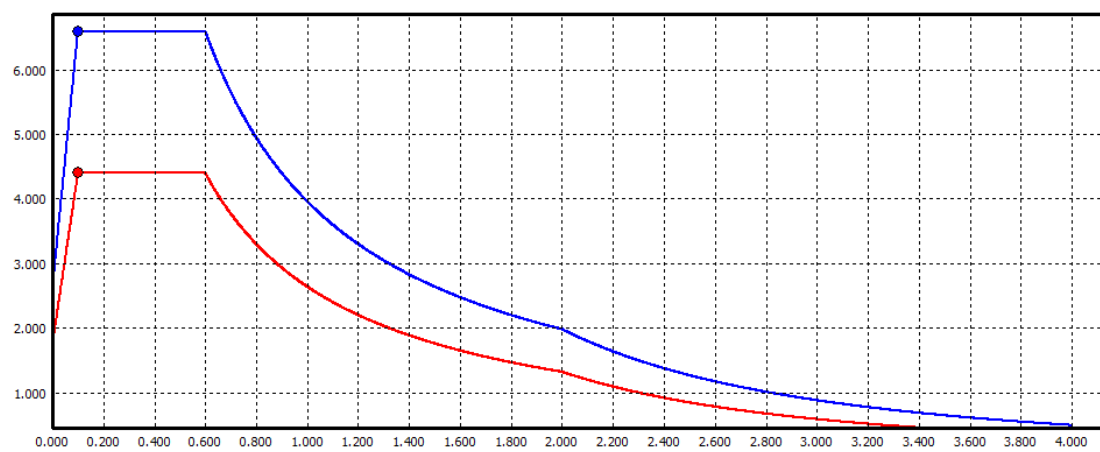


Fig.7.3 – Espectro de Resposta obtido para o sismo Tipo 1

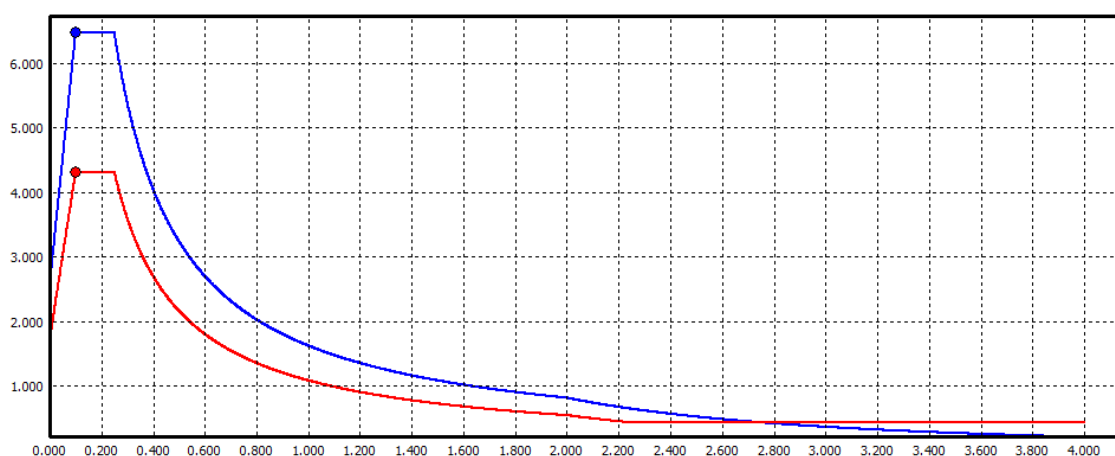


Fig.7.4 – Espectro de Resposta obtido para o sismo Tipo 2

7.4. VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

De forma a modelar a estrutura, verificando o cumprimento das normas, foi necessário cumprir as combinações de ações referentes a situações de projeto persistentes ou transitórias (combinação fundamental) e a situações de projeto sísmicas (combinações sísmicas), de acordo com a NP EN 1990.

Assim sendo, de acordo com a NP EN 1990, as combinações de ações referentes a situações de projeto persistentes ou transitórias e situações de projeto sísmicas, são apresentadas nos Quadros 7.7 e 7.8.

Quadro 7.7 – Combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias

Combinação	$E_d = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q$
γ_G	1.35
γ_Q	1.50

Quadro 7.8 – Combinações de ações para situações de projeto sísmicas

Combinação	$E_d = G + A_{Ed} + \psi_2 \cdot Q$
ψ_2	0.2

7.5. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CAVIDADE DE EROSIÃO

7.5.1 DESCRIÇÃO DO ESCOAMENTO JUNTO A UM PILAR

A erosão localizada é definida como a erosão do leito em torno de um obstáculo inserido num campo de escoamento sobre o leito móvel. Este fenómeno pode afetar a integridade estrutural de pontes e estruturas hidráulicas, levando à falha por descalçamento das fundações e instabilidade estrutural.

A erosão localizada em torno de pilares de pontes é uma das causas mais comuns de falhas de pontes. A existência de uma ponte perto do escoamento modifica o campo de velocidades, aumenta a capacidade de arrastamento dos sedimentos e origina a erosão. Os efeitos combinados dos padrões do fluxo 3D e o desenvolvimento da cavidade de erosão dependente do tempo, torna o fenómeno complexo e de difícil avaliação (Lança 2013).

Como pode ser observado na Figura 7.5, as principais características do campo de velocidades do escoamento são a superfície de enrolamento, o escoamento descendente, vórtice de ferradura e os vórtices de esteira. A estagnação do escoamento na frente do pilar modifica o gradiente de pressão e produz o escoamento descendente. Na base do pilar, o escoamento descendente separa-se e enrola-se formando um escoamento helicoidal, com o nome de vórtice de ferradura, que se dobra ao longo dos lados do pilar, atingindo e mantendo uma velocidade máxima para o escoamento descendente dentro da cavidade de erosão, perto do pilar (Raudkivi 1986). A superfície de enrolamento aparece na superfície livre, a montante

do pilar, girando na direção oposta ao vórtice ferradura. O gradiente de pressão de estagnação também acelera o escoamento que passa no pilar, originando a separação do escoamento para as laterais do pilar e a criação de vórtices de esteira, na interface com o fluxo de abordagem não perturbado (Dey *et al.* 1992). O aumento das velocidades na frente e nas laterais do pilar originam o arrastamento das partículas dos sedimentos, produzindo a cavidade de erosão.

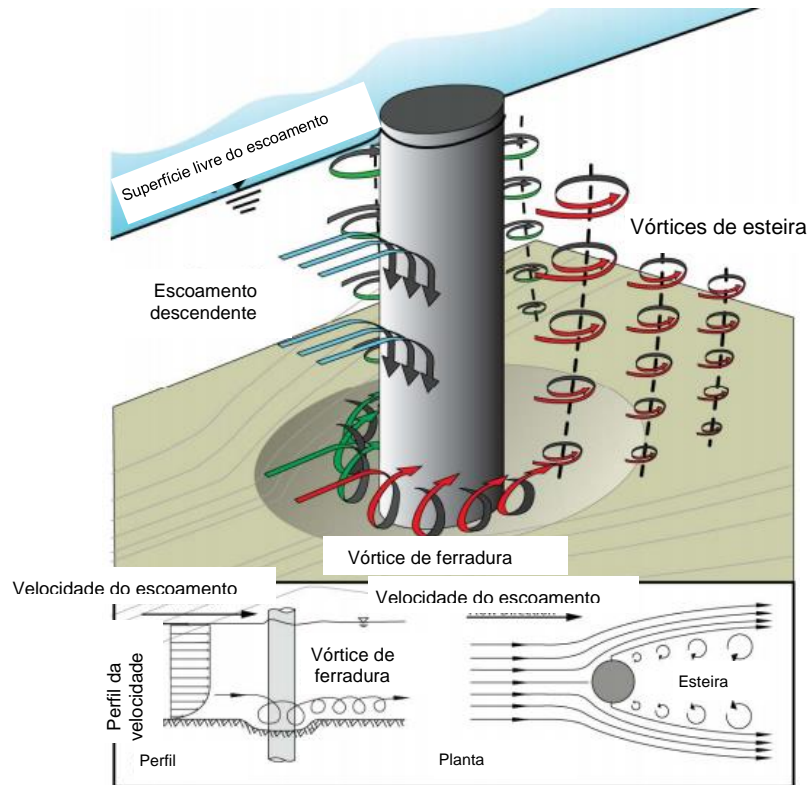


Fig. 7.5 – Escoamento de torno de um pilar cilíndrico, adaptado de Arneson *et al.* (2012)

7.5.2 Variáveis que influenciam o processo erosivo

O processo de erosão de um pilar de uma ponte pode ser descrito pelas seguintes variáveis independentes (c.f. Fael 2007):

- i) Variáveis de escoamento não perturbado: profundidade de fluxo, d , declive da linha de energia, S_r , e aceleração da gravidade, g ;
- ii) Variáveis dos fluidos: densidade de massa, ρ , e viscosidade cinemática, ν ;
- iii) Variáveis dos sedimentos do leito: tamanho médio, D_{50} , coeficiente de graduação, σ_D , e densidade de massa, ρ_s ;
- iv) Variáveis características do pilar: largura pilar, D_p , fator de inclinação angular do pilar, K_α , e fator de forma do pilar, K_s ;

v) Variáveis que descrevem a geometria do canal: largura da secção transversal, B , declive do leito, S_0 , e fator de forma da secção transversal, K_g ;

vi) O tempo, t .

Assim sendo, a profundidade de erosão, d_s , num dado instante, t , é dada por:

$$d_s = \varphi \left[\begin{array}{l} \text{escoamento}(d, S_f, g), \text{fluidos}(\rho, \nu), \text{sedimentos do leito}(D_{50}, \sigma_D, \rho_s), \text{ pilar}(D_p, K_\alpha, K_s), \\ \text{canal}(B, S_0, K_g), \text{ tempo}(t) \end{array} \right] \quad (7.11)$$

onde φ representa uma função genérica, o coeficiente de gradação, σ_D , é definido como $0.5(D_{84.1}/D_{50} + D_{50}/D_{15.9})$ em que D_x representa o diâmetro para o qual $X\%$ em peso de uma mistura de sedimento é menor do que um dado tamanho da malha da peneira. O fator de forma, K_s , é definido como a razão entre a profundidade de erosão observada num pilar com uma forma específica e a profundidade de erosão observada num pilar cilíndrico. O fator de inclinação angular K_α é definido como a razão entre o equilíbrio da profundidade de erosão observada num pilar com um dado ângulo de enviesamento, α , e a profundidade de equilíbrio da cavidade erosão observada no mesmo pilar mas com $\alpha = 0^\circ$. O fator de forma da secção transversal, K_g , é definido como a razão entre a profundidade de erosão observada num pilar inserido num canal, com uma forma de secção transversal específica, e a profundidade observada no mesmo pilar, mas inserido num canal com secção transversal retangular.

O desenvolvimento da erosão localizada junto de um pilar isolado tem sido amplamente investigado através de estudos experimentais em laboratório, no entanto, existem ainda muitos dados de campo que são limitados. Atualmente pode ser encontrada muita literatura sobre erosão localizada junto de pilares simples, contudo o número de estudos sobre pilares complexos ou grupos de pilares é mais restrito, entre os quais podem ser citados Hannah (1978), Elliott and Baker (1985), Salim and Jones (1996), Zhao and Sheppard (1999), Smith (1999), Sumer and Fredsøe (2002), Ataie-Ashtiani and Beheshti (2006). Por pilar complexo entende-se o conjunto coluna, maciço de encabeçamento e grupo de estacas, Figura 7.6.

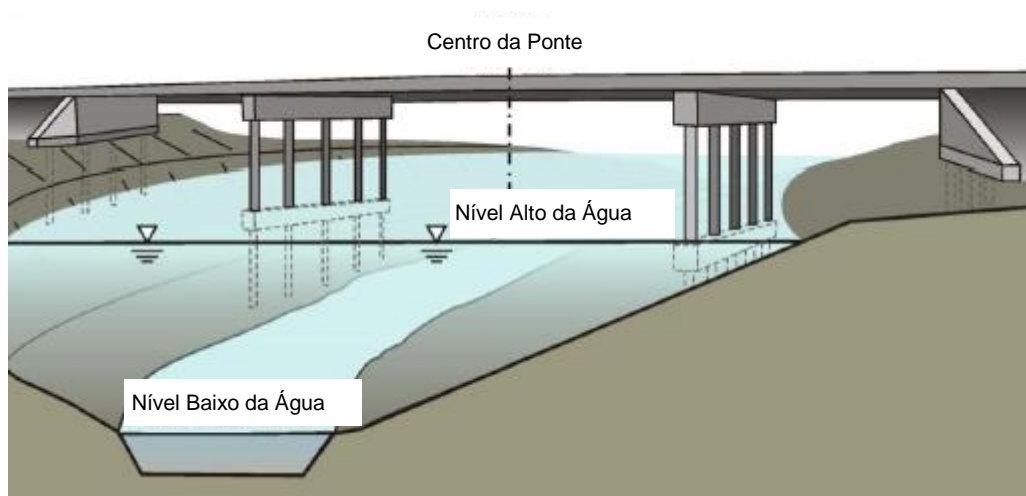


Figura 7.6 – Ponte com pilares complexos, Ettema *et al.* (2011)

Nos Estados Unidos a *Federal Highway Administration* estabelece o código para o cálculo de erosões localizadas junto de pontes, nomeadamente através da *Hidrologic Engineering Circular n.º 18* (HEC-18), publicado por Arneson *et al.* (2012). No presente estudo o cálculo da profundidade de erosão no pilar P1, da estrutura em análise, foi realizado com base na quinta edição do HEC-18.

7.5.3 CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE EROÇÃO JUNTO A UM PILAR SIMPLES

No cálculo da profundidade da cavidade de erosão, considerou-se uma situação hipotética relativamente ao leito. Como tal, adotou-se a geometria da secção transversal sob a ponte em estudo, Figura 7.1, enquanto o diâmetro mediano do sedimento, D_{50} , e o declive do perfil longitudinal da linha de água foram arbitrados.

A equação para o cálculo da erosão localizada em pilares indicada pelo HEC-18 é recomendada para leitos aluvionares, sendo que, através da qual é possível prever a profundidade máxima da cavidade de erosão junto ao pilar. É aplicada a pilares simples e a situações de cursos de água com leitos sedimentos não coesivos, podendo ser adaptada para aplicações em pontes com largura elevada, para configurações mais complexas de pilares, incluindo grupos de pilares e pilares complexos, sendo dada por:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 \cdot K_1 + K_2 + K_3 \cdot \left(\frac{a_{pier}}{y_1} \right)^{0.65} \cdot Fr_1^{0.43} \quad (7.12.)$$

em que y_s representa a profundidade de erosão, em m, y_1 a profundidade do escoamento de aproximação diretamente a montante do pilar, em m, K_1 é o fator de correção para a forma da secção do pilar, K_2 é o fator de correção para o ângulo de enviesamento do pilar face à direção do escoamento, K_3 o fator de correção para a condição do leito, a_{pier} é o diâmetro do pilar, em m, L o comprimento do pilar, em (m), g a aceleração da gravidade, tomando o valor de 9.8 ms^{-2} e Fr_1 o número *Froude* do escoamento de aproximação ao pilar, dado por:

$$Fr_1 = \frac{U}{\sqrt{9.8 \cdot y_1}} \quad (7.13.)$$

sendo U a velocidade do escoamento de aproximação, em ms^{-1} , dada por:

$$U = \frac{Q}{A} \quad (7.14.)$$

sendo A a área da secção transversal do escoamento de aproximação ao pilar, em m^2 , e admitindo que o escoamento de aproximação é uniforme, Q pode ser dado por, em m^3s^{-1} :

$$Q = K_s \cdot A \cdot r^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (7.15.)$$

sendo K_s o coeficiente de de Mannig-Strickler, em $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, dado por:

$$K_s = \frac{1}{n} \quad (7.16.)$$

De acordo com o *Highway Research Board* (in Cardoso 1998) o coeficiente de rugosidade de Mannig-Strickler, $n = 1/K_s$, pode ser correlacionado com o diâmetro mediano do sedimento D_{50} através de:

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (7.17.)$$

sendo S_0 o declive do perfil longitudinal do leito e r o raio hidráulico, em m, dado por:

$$r = \frac{A}{P} \quad (7.18.)$$

Sendo P , o perímetro da secção de influência para o cálculo da profundidade de descalçamento, em m.

De acordo com a Figura 7.1, a secção transversal do leito é aproximadamente trapezoidal, permitindo um escoamento de aproximação ao pilar com 7 m de profundidade, possuindo, uma das margens 19.6m e a outra 10.5m, estando dimensionada para extensão, um caudal de ponta de cheia de $1194.73 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, conforme indicado no Quadro 7.9. O tamanho mediano do sedimento é $D_{50} = 0.03 \text{ m}$ e o declive do perfil longitudinal da linha de água considerado foi de $S_0 = 0.0005 \text{ m/m}$.

Quadro 7.9 – Variáveis do escoamento e do leito, necessárias para o cálculo da profundidade de descalçamento,

y_s										
A (m)	P (ms^{-2})	r (m)	D_{50} (m)	n	K_s ($\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$)	S_0 (mm^{-1})	Q (m^3s^{-1})	U (ms^{-1})	F_r	y_1 (m)
455.35	83.43	5.46	0.03	0.026	37.85	0.0005	1194.73	2.62	0.32	7

A velocidade critica, U_c , dada pela Equação 7.22, é de 2.62 ms^{-1} , pelo que $U \leq U_c$, logo o escoamento de aproximação ao pilar não tem capacidade de mobilizar sedimentos, pelo que se considera uma situação de leito fixo.

Pela aplicação da equação 7.12, resulta a erosão uma profundidade de erosão de 4.16 m junto ao pilar P1 (Quadro 7.10). Contudo este resultado considera apenas o efeito da coluna do pilar e assume que esta se prolonga indefinidamente sob o leito aluvionar.

Quadro 7.10 – Valor da profundidade de descalçamento, y_s e seus parâmetros

a_{pier} (m)	K_1	K_2	K_3	y_s (m)
2.0	1.0	1.0	1.1	4.16

7.5.4. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE EROSÃO JUNTO A UM PILAR COMPLEXO

O HEC-18 contempla o caso do pilar complexo, constituído por coluna, maciço de encabeçamento ou sapata e grupo de estacas.

Na Figura 7.7 é possível observar as três componentes que um pilar complexo pode possuir, sendo de notar que o pilar em análise, só tem duas, a componente do pilar e a componente da sapata, uma vez que não possui estacas.

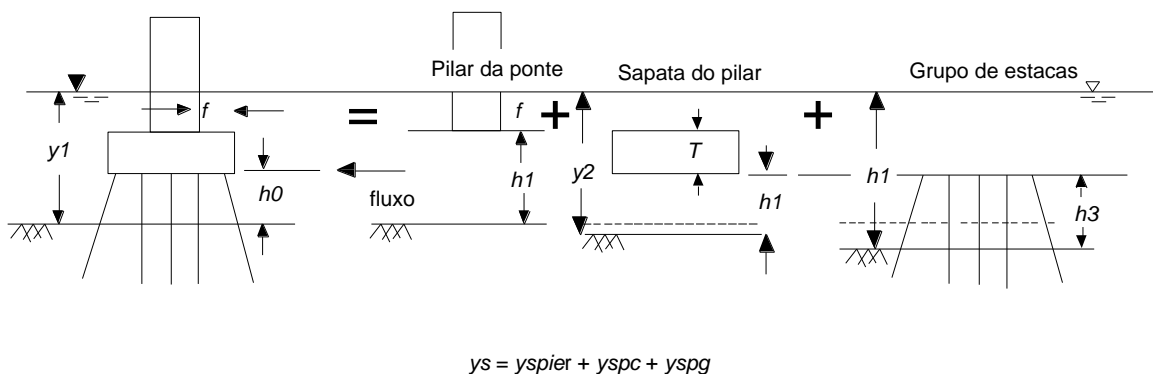


Fig.7.7 – Componentes de um pilar complexo, adaptado de Arneson *et al.* (2012)

Segundo Arneson *et al.* (2012) *i.e.* HEC-18 é necessário ter em conta que a sapata do pilar pode estar acima da superfície da água, no seio do escoamento ou abaixo do fundo do leito, podendo a sua localização resultar do proposto no projeto ou da erosão generalizada ou localizada existente a longo prazo.

No projeto inicial da estrutura em análise, a sapata encontrava-se enterrada, no entanto nas condições de escoamento e leito consideradas no presente estudo o desenvolvimento da cavidade de erosão acaba por expor a sapata ao escoamento. Nesta situação o pilar é considerado um pilar complexo.

Assim sendo, determina-se a profundidade máxima da cavidade de erosão, tendo em conta que a erosão total, resultante da sobreposição das componentes,

$$y_s = y_{spier} + y_{spc} + y_{spg} \quad (7.19.)$$

Sendo y_s a profundidade total de erosão, em m, y_{spier} , a componente da erosão referente à coluna, em m, y_{spc} , a componente da erosão referente à sapata do pilar, em m e y_{spg} , a componente da erosão das estacas, em m.

A profundidade de erosão referente à componente do pilar, é dada por:

$$y_{spier} = y_s \cdot K_{hpier} \quad (7.20.)$$

Sendo y_s a profundidade de descalçamento, calculado de acordo com a Equação 7.12, em m e K_{hpier} é o coeficiente que contabiliza a altura da coluna do pilar acima do leito e o efeito de proteção da sapata a uma distância f , do pilar, dado pela seguinte figura:

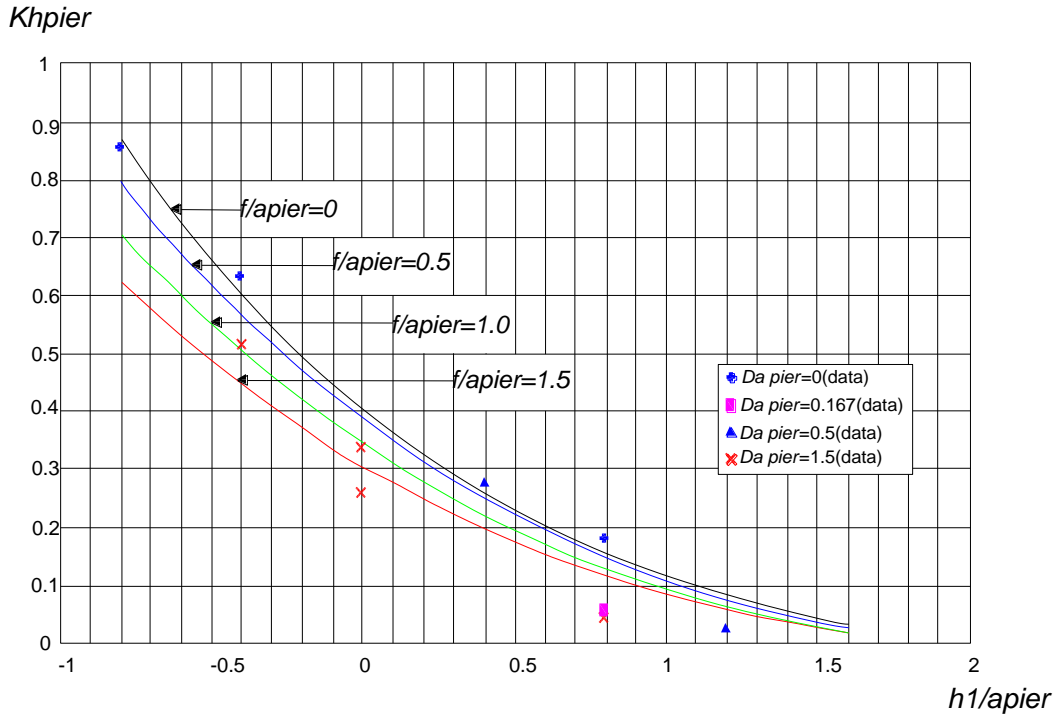


Fig.7.8 – Ábaco para a determinação de K_{hpier} , adaptado de Arneson *et al.* (2012)

O parâmetro K_{hpier} varia em função de h_1/a_{pier} e de f/a_{pier} , sendo h_1 a altura da coluna do pilar acima do leito, antes do descalçamento, em m, a_{pier} o diâmetro do pilar, em m, e f , a distância entre a borda frontal da sapata e o pilar, em m.

No quadro que se segue apresenta-se o valor obtido da profundidade de erosão referente à componente do pilar, bem como, dos parâmetros que a influenciam.

Quadro 7.11 – Valor relativo ao cálculo da profundidade de descalçamento, y_{spier} e seus parâmetros

y_s (m)	h_1/a_{pier}	f/a_{pier}	K_{hpier} (m)	y_{spier} (m)
4.16	-0.50	0.50	0.62	2.58

Na Figura 7.9 é possível observar a cavidade de erosão, resultante do efeito da coluna do pilar P_1 :

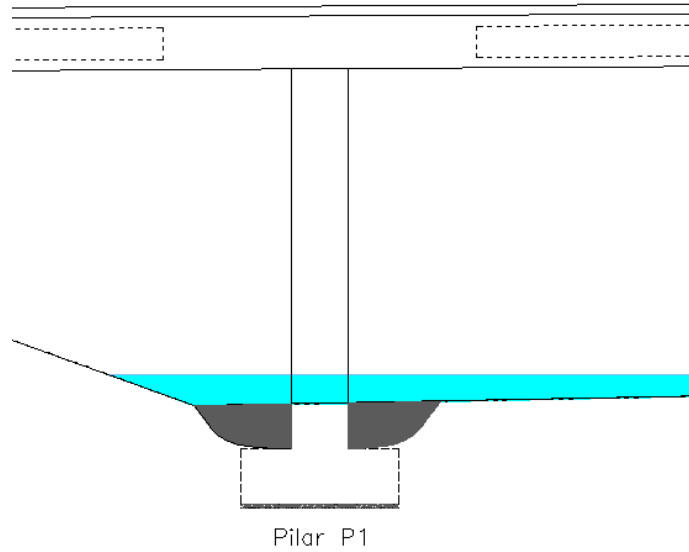


Figura 7.9 – Representação da cavidade de erosão, devido ao efeito da coluna do pilar P_1

Obtida a profundidade da cavidade de erosão junto ao pilar, considerando apenas o efeito da coluna, passou-se então ao cálculo da profundidade da cavidade de erosão por a sapata ficar exposta ao escoamento. De acordo com o HEC-18 a componente da profundidade de erosão, referente à sapata do pilar é dada por:

$$\frac{y_{spc}}{y_f} = 2.0 \cdot K_1 + K_2 + K_3 \cdot K_w \left(\frac{a_{pc}}{y_f} \right)^{0.65} \cdot \left(\frac{V_f}{\sqrt{g \cdot y_f}} \right)^{0.43} \quad (7.21.)$$

sendo y_f , a distância do leito ao topo da sapata, em m, a_{pc} é a largura inicial da sapata, em m, K_1 , K_2 e K_3 , foram referidos anteriormente, K_w o fator de correção para pilares grandes em águas pouco profundas, sendo o seu valor dado em função do quociente U/U_c , sendo U_c a velocidade crítica do escoamento (velocidade a partir da qual o escoamento tem capacidade de transportar o sedimento de dimensão D_{50}), em ms^{-1} , dada por:

$$U_c = 6.1 \cdot y_1^{1/6} \cdot D_{50}^{1/3} \quad (7.22.)$$

O valor de y_f é dado por, encontrando-se as suas variáveis definidas anteriormente:

$$y_f = \frac{h_1 + y_{spier}}{2} \quad (7.23.)$$

A velocidade do escoamento junto ao fundo que atinge a sapata é inferior à velocidade média do escoamento, assim e assumindo a distribuição logarítmica de velocidades, o HEC-18 propõe a correção da velocidade do escoamento de aproximação à sapata de acordo com a Figura 7.10 e Equação 7.24.

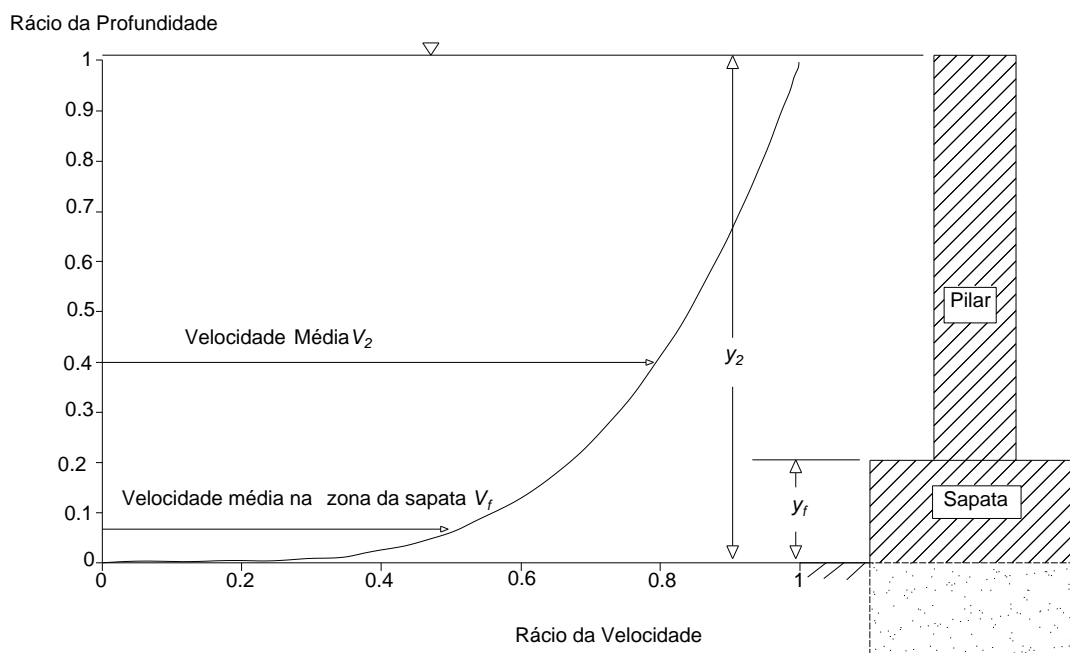


Fig.7.10 – Gráfico que define a velocidade e a profundidade em sapatas expostas, adaptado de Arneson *et al.* (2012)

Ainda, no que diz respeito à expressão 7.21, V_f representa a velocidade média na zona do fluxo abaixo da parte superior da sapata, em ms^{-1} , dada por:

$$V_f = \frac{\ln\left(10.93 \cdot \frac{y_f}{K_s} + 1\right)}{\ln\left(10.93 \cdot \frac{y_2}{K_s} + 1\right)} \cdot V_2 \quad (7.24.)$$

sendo, y_2 a profundidade do escoamento ajustada, a montante da ponte, em m e V_2 a velocidade média ajustada, do fluxo na vertical, próxima da ponte, em (ms^{-1}), dada pela seguinte expressão:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{y_{spier}}{2} \quad (7.25.)$$

No quadro seguinte apresenta-se o valor obtido da profundidade de erosão relativo à componente da sapata, bem como, dos parâmetros utilizados no seu cálculo.

Quadro 7.12 – Valor relativo ao cálculo da profundidade de descalçamento, y_{spc} e seus parâmetros

K_1	K_2	K_3	K_w	U/U_c	a_{pc}	y_2 (m)	V_2 (ms^{-1})	V_f (ms^{-1})	y_f (m)	y_{spc} (m)
1	1	1	1	1.00	4.0	8.29	2.21	2.16	0.29	3.91

Assim sendo, o valor final da profundidade máxima de descalçamento, do pilar P_1 , tendo em conta a erosão total, é $y_s=6.49$ m.

Na Figura 7.11 é possível observar, a tracejado, a cavidade de erosão devido ao efeito da coluna do pilar P_1 e, a linha cheia, a cavidade de erosão devido ao efeito combinado da coluna e da sapata do pilar P_1 .

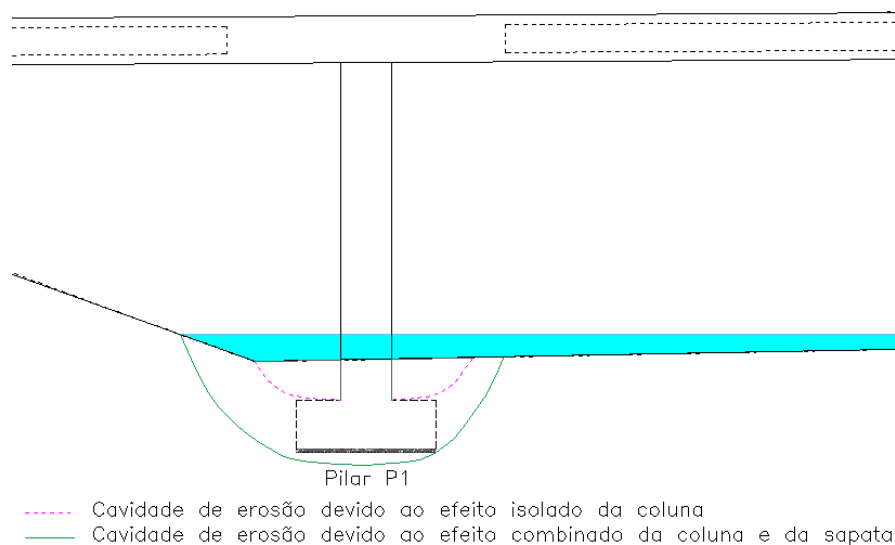


Figura 7.11 – Representação da cavidade de erosão, devido ao efeito isolado da coluna do pilar P_1 e devido ao efeito combinado da coluna e da sapata do pilar P_1

7.5.5. CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE EROSIÃO JUNTO A UM PILAR COMPLEXO NUMA CHEIA PÓS-INCÊNDIO

Considerando uma bacia hidrográfica semelhante à bacia hidrográfica do Séqua e o efeito de um incêndio como o de Catraia, o incremento do caudal de ponta de cheia associada a um período de retorno de 100 anos é de 14%, conforme demonstrado no capítulo 6. Neste caso o caudal pós incêndio será de $1298 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, as variáveis relativas às dimensões da secção transversal são iguais às apresentadas no Quadro 7.9, sendo as variáveis do escoamento e do leito, apresentadas no quadro seguinte:

Quadro 7.13 – Variáveis do escoamento e do leito, necessárias para o cálculo da profundidade de descalçamento, y_s

D_{50} (m)	n	K_s ($\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$)	S_0 (mm^{-1})	Q (m^3s^{-1})	U (ms^{-1})	F_r	y_1 (m)
0.040	0.028	36.08	0.0005	1298.22	2.85	0.34	7

De seguida apresentam-se os valores da profundidade de erosão (Quadro 7.14), devido ao efeito da coluna do pilar P_1 , determinado de acordo com a Equação 7.20:

Quadro 7.14 – Valor relativo ao cálculo da profundidade de descalçamento devido ao efeito da coluna, y_{spier} e seus parâmetros, considerando um pilar complexo

y_s (m)	h_1/a_{pier}	f/a_{pier}	K_{pier} (m)	y_{spier} (m)
4.31	-0,50	0.50	0.62	2.67

No Quadro 7.15 é possível observar os valores referentes à profundidade de erosão, devido ao efeito da sapata do pilar P_1 , determinado de acordo com a Equação 7.21:

Quadro 7.15 – Valores relativos ao cálculo da profundidade de descalçamento devido ao efeito da sapata, y_{spc} e seus parâmetros, considerando um pilar complexo

K_1	K_2	K_3	K_w	U/U_c	a_{pc}	y_2 (m)	V_2 (ms ⁻¹)	V_f (ms ⁻¹)	y_f (m)	y_{spc} (m)
1	1	1	1	0.99	4.0	8.34	2.40	2.33	0.34	4.12

Assim sendo, o valor final da profundidade máxima de descalçamento, do pilar P_1 , tendo em conta a erosão total, para o cenário pós-incêndio, é $y_s=6.80$ m.

De acordo com os resultados obtidos, para o cenário pré-incêndio, é possível verificar que a profundidade de erosão devido ao efeito da coluna expõe a totalidade da sapata. Posteriormente o efeito da sapata no escoamento e a interação deste com o fundo vai potenciar a profundidade de erosão em mais 3.91 m, perfazendo um total de 6.49 m.

No cenário pós-incêndio, a profundidade de erosão devido ao efeito da coluna expõe também a totalidade da sapata, sendo a exposição maior em 9 cm, relativamente ao cenário pré-incêndio. Posteriormente o efeito da sapata no escoamento e a interação deste com o fundo vai potenciar a profundidade de erosão em mais 4.12 m, perfazendo um total de 6.80 m, registando um aumento de 0.31 m face à situação de cheia pré-incêndio.

Os valores calculados de acordo com o HEC-18 são valores de equilíbrio da cavidade de erosão e são atingidos após um tempo bastante longo de exposição ao caudal de ponta de cheia.

Como a cheia considerada tem um período de retorno de 100 anos e uma duração de aproximadamente 24 horas, é de esperar que o desenvolvimento da cavidade de erosão seja lento e aumente progressivamente com a ocorrência de cheias ao longo dos anos.

Para efeitos da análise estrutural consideram-se três situações:

i) situação inicial sem desenvolvimento da cavidade de erosão;

- ii) situação em que apenas a base da sapata se encontra apoiada, tendo sido removido todo o solo acima;
- iii) situação em que a sapata fica descalça, deixando de ter contacto com o solo.

7.6. RESULTADOS OBTIDOS ESTRUTURALMENTE DEVIDOS AO DESCALÇAMENTO DA FUNDAÇÃO

Após obtida a profundidade máxima da cavidade de erosão simulou-se este fenómeno, através do *software* SAP2000, de forma a perceber quais os efeitos que o mesmo provoca no comportamento estrutural da ponte.

Para tal, primeiramente, foi necessário definir a rigidez das molas, K , existentes na fundação do pilar P_1 e do pilar P_2 , antes e depois do descalçamento da fundação. A rigidez das molas, K , é dada por:

$$K = K_S \cdot A_{inf} \tag{7.23.}$$

Sendo $K_S=40000 \text{ kNm}^{-3}$, designando-se o módulo de reação do solo e considerando-se uma areia média densa, e A_{inf} é a área de influência de cada nó, no modelo de elementos finitos da base da sapata, em m^2 .

No modelo utilizado, existem três direções distintas; 1, 2 e 3, a aplicar às molas, da sapata, e sete tipos de molas, A , B , C , D , E , F e G . Tendo em conta a localização das mesmas na sapata, irão existir valores distintos, relativamente à rigidez das molas, devido às diferentes áreas de influência da sapata e tipo de contacto com o solo. Na Figura 7.12 é possível observar a distribuição das molas, tendo em conta a localização das mesmas, na sapata.

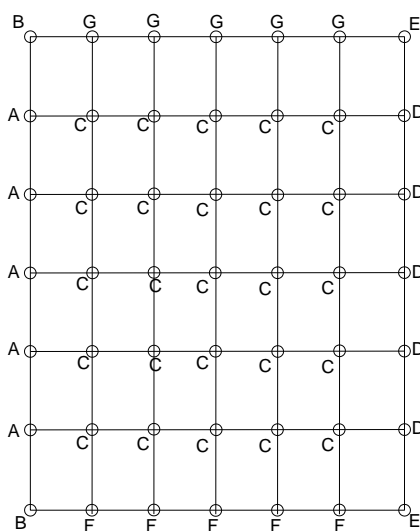


Fig.7.12 – Distribuição dos vários tipos de molas tendo em conta a localização das mesmas, na sapata

É de notar que, de forma a simplificar o processo de cálculo e uma vez que não possuímos dados suficientes acerca das características do solo em que a estrutura está assente, assumiu-se que se trata de um solo isotrópico, possuindo este o mesmo comportamento, verticalmente e horizontalmente, bem como, que as respetivas molas possuem um comportamento linear. Trata-se portanto de simplificações face à realidade, dado que o comportamento do solo é não-linear e não-isotrópico.

No quadro seguinte é possível observar o valor final da rigidez das molas, a aplicar nas duas sapatas, tendo em conta as direções distintas e o tipo das mesmas, antes da ocorrência do descalçamento da fundação do pilar P_i :

Quadro 7.16 – Valor da rigidez das molas, K , antes do descalçamento da fundação do pilar P_i , a aplicar às duas sapatas

Tipo de molas	Direção das molas	A_{inf} (m ²)	K (kNm ⁻³)
A	1	0.702	28060
	2	0.583	23300
	3	0.690	27600
B	1	1.403	56120
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800
C	1	0.230	9200
	2	0.230	9200
	3	0.690	27600
D	1	0.115	4600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800
E	1	0.058	2300
	2	0.058	2300
	3	0.690	27600
F	1	1.165	46600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800
G	1	0.115	4600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800

Após o descalçamento do pilar P_1 , o valor da rigidez a aplicar às molas da sapata P_1 , sofre alterações, mantendo-se inalterado o valor da rigidez a aplicar às molas da sapata P_2 , de forma a simular uma situação de assentamento diferencial (Quadro 7.17).

Quadro 7.17 – Valor da rigidez das molas, K , após o descalçamento da fundação do pilar P_1 , a aplicar à sapata P_1

Tipo de molas	Direção das molas	A_{inf} (m ²)	K (kNm ⁻³)
A	1	0.058	2300
	2	0.058	2300
	3	0.690	27600
B	1	0.115	4600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800
C	1	0.230	9200
	2	0.230	9200
	3	0.690	27600
D	1	0.115	4600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800
E	1	0.058	2300
	2	0.058	2300
	3	0.690	27600
F	1	0.115	4600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800
G	1	0.115	4600
	2	0.115	4600
	3	0.345	13800

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos antes e após o descalçamento da fundação, para a combinação fundamental de ações, tendo em conta que o mesmo varia com o tempo. Para simular esta situação, retiraram-se as molas existentes na sapata do pilar P_1 , alinhamento a alinhamento, até se retirarem, por completo, todas as molas.

No Quadro 7.18 são apresentados os momentos no apoio e a meio vão, o esforço transverso, a respetiva frequência e o modo de vibração mais gravoso para cada direção, antes e à medida que a sapata começa a descalçar.

Quadro 7.18 – Valores obtidos para os momentos no apoio e a meio vão, frequência e modos de vibração, tendo em conta as molas da sapata do pilar P_1

Localização das molas na sapata	$V_{2,apoio}$ (kN)	$V_{2, meio vão}$ (kN)	$M_{3,apoio}$ (kNm ⁻¹)	$M_{3,meio vão}$ (kNm ⁻¹)	Frequência (Hz)	U_X	U_Y	U_Z
Com molas em todos os alinhamentos	-65.56	802.42	-1992.18	3497.04	13.30	0.62	0.70	0.28
Sem molas numa das laterais	-76.09	804.59	-1989.41	3475.35	12.96	0.62	0.70	0.37
Sem molas numa das laterais e na base	-82.67	805.95	-1987.67	3461.78	12.92	0.63	0.70	0.43
Sem molas num alinhamento	136.53	852.35	-1617.70	3506.88	12.77	0.61	0.70	0.27
Sem molas em 2 alinhamentos	573.71	968.72	-887.58	3567.80	12.65	0.58	0.71	0.49
Sem molas em 3 alinhamentos	1243.59	1177.03	212.60	3630.19	12.55	0.45	0.72	0.50
Sem molas em 4 alinhamentos	2295.57	1538.83	1888.24	3712.23	12.47	0.56	0.50	0.50
Sem molas em 5 alinhamentos	4115.98	2195.07	4639.87	3906.53	12.39	0.55	0.74	0.50
Sem molas em 6 alinhamentos	-8387.88	3700.63	10524.29	4780.88	12.32	0.53	0.74	0.51
Sem molas nos alinhamentos	23242.24	8456.84	28422.00	10158.72	12.28	0.52	0.66	0.51

No Quadro 7.19 possível observar os valores relativos ao deslocamento vertical e à rotação existentes na sapata do pilar P_1 , tendo em conta, a localização das molas, antes e após o descalçamento da mesma, para a combinação fundamental de ações:

Quadro 7.19 – Valores relativos ao deslocamento vertical e à rotação na sapata do pilar P_1

Localização das molas na sapata	δ_v (mm)	θ
Com molas em todos os alinhamentos	4.8	9×10^{-5}
Sem molas numa das laterais	4.8	7×10^{-5}
Sem molas numa das laterais e na base	4.8	6×10^{-5}
Sem molas num alinhamento	5.4	0.0001
Sem molas em 2 alinhamentos	6.6	0.0004
Sem molas em 3 alinhamentos	8.5	0.0007
Sem molas em 4 alinhamentos	11.7	0.0011
Sem molas em 5 alinhamentos	17.0	0.0015
Sem molas em 6 alinhamentos	29.0	0.0017
Sem molas nos alinhamentos	68.0	0.00015

Através da observação do quadro anterior é possível verificar que os deslocamentos verticais na sapata aumentam significativamente, à medida que se vão retirando as molas da sapata, ou seja, à medida que a mesma vai sofrendo erosão.

No Quadro 7.20 apresentam-se as percentagens relativas os momentos existentes na base do pilar P_1 , para a combinação fundamental de ações, após o descalçamento da respetiva sapata, relativamente à estrutura inicial, ou seja, quando a sapata possui molas em todos os alinhamentos:

Quadro 7.20 – % relativa ao valor dos momentos existentes na base do pilar P_1

Localização das molas na sapata	M_2	M_3
Com molas em todos os alinhamentos	192.32 kNm ⁻¹	153.45 kNm ⁻¹
Sem molas numa das laterais	101 %	84 %
Sem molas numa das laterais e na base	102 %	75 %
Sem molas num alinhamento	93 %	955.47 %
Sem molas em 2 alinhamentos	89 %	2249.81 %
Sem molas em 3 alinhamentos	84 %	3606.64 %
Sem molas em 4 alinhamentos	78 %	4856.96 %
Sem molas em 5 alinhamentos	69 %	5731.29 %
Sem molas em 6 alinhamentos	53 %	5473.42 %
Sem molas nos alinhamentos	0.00 %	0.00 %

Através da análise ao quadro anterior é possível observar que os momentos M_2 diminuem, à medida que se vão retirando as molas da sapata e que, pelo contrário, os momentos, M_3 aumentam abruptamente, à medida que a sapata vai sofrendo erosão.

De seguida, é possível observar os modos de vibração da estrutura obtidos, antes e após o descalçamento da sapata, para uma análise modal, verificando-se as grandes diferenças existentes na estrutura, após o descalçamento da fundação.

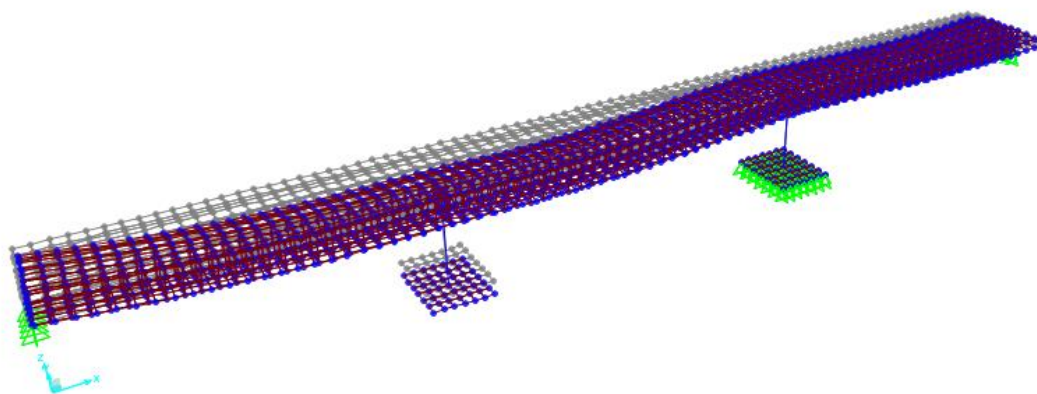


Fig.7.13 – Modo de vibração antes do descalçamento da sapata

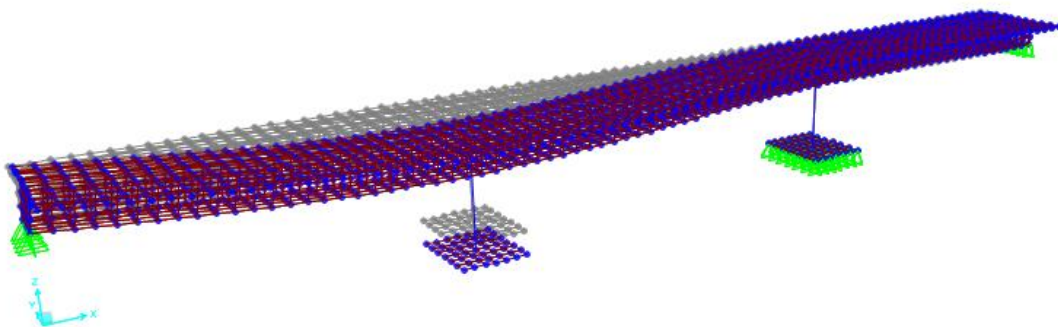


Fig.7.14 – Modo de vibração após o descalçamento da sapata

No que diz respeito à combinação sísmica, de forma a compreender a influência que as molas têm na estrutura, quando esta está sujeita ao sismo, determinaram-se os deslocamentos horizontais, bem como as respetivas frequências.

No Quadro 7.21 é possível observar os valores relativos ao deslocamento horizontal, bem como à frequência, existentes na sapata do pilar P_1 , tendo em conta, a localização das molas, antes e após o descalçamento da mesma, para a combinação sísmica de ações:

Quadro 7.21 – Valores relativos ao deslocamento horizontal e à frequência na sapata do pilar P_1

Localização das molas na sapata	δ_H (mm)	Frequência (Hz)
Com molas em todos os alinhamentos	0.21	13.30
Sem molas numa das laterais	0.31	12.96
Sem molas numa das laterais e na base	0.36	12.92
Sem molas num alinhamento	0.82	12.77
Sem molas em 2 alinhamentos	1.66	12.65
Sem molas em 3 alinhamentos	2.82	12.55
Sem molas em 4 alinhamentos	4.35	12.47
Sem molas em 5 alinhamentos	6.28	12.39
Sem molas em 6 alinhamentos	8.39	12.32
Sem molas nos alinhamentos	5.33	12.28

Como foi já referido, comprova-se que, apesar das frequências diminuírem à medida que a sapata vai sofrendo erosão, tal facto é gravoso e ambíguo, em termos sísmicos, uma vez que os deslocamentos horizontais aumentam, mesmo com a diminuição das frequências, o que

nos mostra a grande importância das molas em termos de modelo de cálculo e o grande impacto da erosão nas sapatas, em termos físicos.

Através da análise efetuada, é possível verificar que quanto maior for a erosão nas sapatas, maior será o deslocamento horizontal o que, aliado à existência de um sismo, poderá provocar o colapso da estrutura.

No Quadro 7.22 apresentam-se as percentagens relativas os momentos existentes na base do pilar P_1 , para a combinação sísmica de ações, após o descalçamento da respetiva sapata, relativamente à estrutura inicial, ou seja, quando a sapata possui molas em todos os alinhamentos:

Quadro 7.22 – % relativa ao valor dos momentos existentes na base do pilar P_1

Localização das molas na sapata	M_2	M_3
Com molas em todos os alinhamentos	3071.48 kNm ⁻¹	132.11 kNm ⁻¹
Sem molas numa das laterais	99 %	16.19 %
Sem molas numa das laterais e na base	99 %	50.65 %
Sem molas num alinhamento	87 %	107.19 %
Sem molas em 2 alinhamentos	74 %	268.50 %
Sem molas em 3 alinhamentos	59 %	472.83 %
Sem molas em 4 alinhamentos	40 %	640.56 %
Sem molas em 5 alinhamentos	20 %	712.10 %
Sem molas em 6 alinhamentos	3 %	582.45 %
Sem molas nos alinhamentos	6 %	106.03 %

Através da análise do Quadro 7.22 é possível observar que os momentos M_2 diminuem e que, pelo contrário, os momentos, M_3 aumentam abruptamente, à medida que a sapata vai sofrendo erosão.

Nas figuras que se seguem, é possível observar as diferenças existentes, relativamente ao modo de vibração da estrutura, antes e após o descalçamento da fundação, para a combinação sísmica.

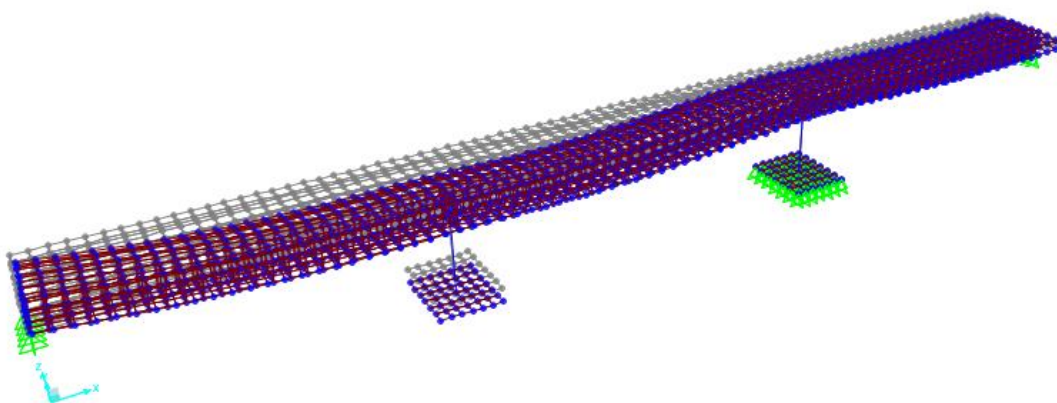


Fig.7.15 – Modo de vibração antes do descalçamento da sapata

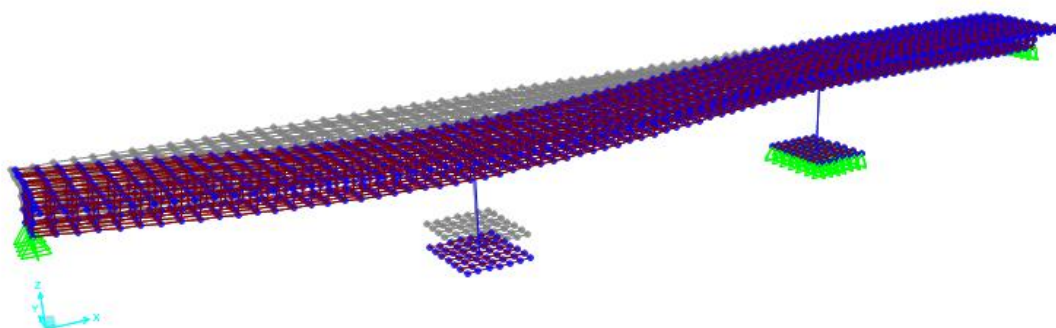


Fig.7.16 – Modo de vibração após o descalçamento da sapata

7.7. CONCLUSÕES

Das análises efetuadas e dos correspondentes resultados obtidos, concluiu-se que a erosão localizada pode afetar substancialmente o comportamento estrutural de pontes e, como foi exposto, a existência de um cenário pós-incêndio poderá agravar estes efeitos negativos.

De facto, consultando o Quadro 7.20, verifica-se que o simples descalçamento de uma pequena área de sapata conduz a um incremento exponencial no momento fletor na direção em causa, o que implica a formação de uma rótula plástica na base do pilar, que conduz a alteração da distribuição de esforços em toda a estrutura, perda de redundância e possível instabilidade por encurvadura do pilar devida à alteração das condições de fronteira. O mesmo fenómeno ocorre para a Ação de base sísmica (Quadro 7.22), com menor impacto percentual dada a redução do esforço normal resultante da própria combinação, que emprega os valores quase-permanentes das sobrecargas.

Relativamente ao assentamento vertical do pilar, no Quadro 7.19 apresenta-se o seu valor para cada situação simulada, verificando-se um incremento gradual, com agravamento após o descalçamento de 3 alinhamentos de nós. Este agravamento tem impacto não apenas na direção vertical, mas também na rotação da sapata induzindo os momentos na base do pilar, atrás analisados.

Através da análise do Quadro 7.18 é possível verificar que, à medida que a sapata vai perdendo o seu confinamento, ou seja, à medida que a mesma vai descalçando, os momentos nos apoios e a meio vão da estrutura, vão aumentando de forma significativa, sendo que, no caso do momento no apoio existe uma inversão de sinal, o que significa que este será um dos principais focos potenciadores de colapso, dado que, não é expectável que em projeto tivesse sido simulada uma situação tão extrema para o dimensionamento das armaduras na face inferior do tabuleiro, nesta secção.

O mesmo tipo de agravamento significativo ocorre relativamente ao esforço transversal.

Relativamente à frequência da estrutura é possível observar que a mesma diminui, à medida que se vão retirando as molas dos alinhamentos, o que numa primeira análise parece reduzir a influência da Ação sísmica, com redução dos valores espectrais associados, mas que na realidade não se verifica, atendendo à diminuição da redundância da estrutura nas fundações e potenciando o seu desequilíbrio, conforme já foi demonstrado.

Para a máxima profundidade de erosão determinada, ou seja, para a situação em que a sapata fica sem a totalidade das molas, a mesma irá descalçar, ficando o pilar P_1 suspenso, o que faz com que os momentos na estrutura aumentem abruptamente, com natural exceção do momento na base do pilar, dado que a sapata deixa de estar em desequilíbrio, mas esta situação limite será irreal, porque a estrutura teria já colapsado, para um estágio de erosão anterior.

8. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

8.1 CONCLUSÕES

Este estudo contribui para a caracterização do efeito dos incêndios florestais nas propriedades hidráulicas dos solos e na curva número, para uma melhor compreensão da relação entre um incêndio e o regime de cheias pós-incêndio e também do efeito que a erosão localizada, junto a um pilar de uma ponte, tem sobre o comportamento estrutural da mesma.

No que se refere à caracterização do efeito dos incêndios florestais sobre as propriedades hidráulicas dos solos, este estudo permitiu verificar que, num incêndio, com o aumento da quantidade de material combustível, das temperaturas registadas no solo e do tempo de exposição às mesmas, aumenta a quantidade de cinza depositada sobre a superfície do solo e, conseqüentemente diminui da taxa de infiltração potencial, sendo este efeito mais acentuado em solos de textura arenosa e faz-se sentir com menor intensidade nos solos de textura argilosa.

Com base nos ensaios realizados no laboratório, em solos de textura arenosa franca, verifica-se que a condutividade hidráulica, sorvidade e potencial do solo tendem a diminuir com o aumento da carga de material combustível e conseqüente intensidade do incêndio.

É de notar que os modelos de Philips e Green-Ampt mostram ser válidos para cenários pós-incêndio, desde que os valores de condutividade hidráulica, sorvidade, potencial, teor de água inicial e porosidade sejam previamente corrigidos.

Com base em ensaios laboratoriais verificou-se que os valores de *CN* aumentam com a intensidade do incêndio, sendo este efeito mais significativo nos solos de textura arenosa do que nos solos de textura argilosa.

A modificação nos valores de *CN* com base no efeito do incêndio sobre a condutividade hidráulica do solo, contempla o efeito do calor, deposição de cinzas e presença de compostos voláteis no solo, contudo não considera as alterações dos usos do solo e coberto vegetal, causados pelo incêndio.

No que se refere à relação entre a ocorrência de um incêndio florestal e o regime de cheias pós-incêndio, verifica-se que através do índice difference Normalized Burn Ratio (dNBR) obtido com base em imagens LANDSAT 7, a recuperação das zonas afetadas pelo incêndio de Catraia durante os anos de 2012 a 2014 é mais rápida no primeiro ano, tendendo a abrandar, o que faz com que as condições pré-incêndio sejam repostas após um número elevado de anos. De qualquer modo em 2014 constatou-se que deixaram de existir áreas com classificação de severidade alta (dNBR4).

As sub-bacias hidrográficas mais atingidas pelo incêndio foram Alportel2, MJudeu e Alportel1. Nestas sub-bacias a taxa de incremento do caudal de ponta de cheia para Tr_{100} face à condição pré-incêndio foi de 15%, 15% e 20% em 2012, 6%, 6% e 8% em 2013. Em 2014 as diferenças face a 2013 são muito pequenas. Para Tr_{10} as diferenças são maiores, apresentando incrementos do caudal de ponta de cheia face às condições pré-incêndio de

28%, 28% e 33% em 2012 e de 10%, 10% e 14% em 2013. Em 2014 é de esperar uma pequena redução face ao ano anterior.

As sub-bacias hidrográficas ASeca e Séqua praticamente não foram afetadas pelo incêndio, fazendo com que o incremento do caudal de ponta de cheia, pós-incêndio, face ao que seria sentir em cenário pré-incêndio, seja atenuado.

O efeito do incêndio na resposta hidrológica das sub-bacias hidrográficas é mais acentuado para precipitações mais frequentes e com menor intensidade. Na precipitação com Tr_{100} a relação P_e/P é muito elevada mesmo no cenário pré-incêndio e apresenta capacidade limitada de aumentar apesar das alterações provocadas pelo incêndio nos solos e no coberto vegetal.

Relativamente ao efeito da erosão localizada em pilares de pontes verifica-se que este afeta o comportamento estrutural de pontes, sendo de esperar um agravamento em cenário pós-incêndio.

Os resultados obtidos demonstram que o descalçamento de apenas uma pequena parte da sapata do pilar leva a incremento exponencial do momento fletor existente. Este incremento é alterado à medida que se vão retirando as molas dos alinhamentos, ou seja, à medida que se vai simulando o descalçamento gradual da sapata, verificando-se também um aumento gradual do assentamento vertical do respetivo pilar, bem como, da rotação da sapata.

É de notar também que, à medida que a sapata começa a perder o ser confinamento pelo solo, ou seja, à medida que vai sofrendo erosão, os momentos nos apoios a meio vão da estrutura aumentam abruptamente, potenciando assim o colapso da estrutura, uma vez que em projeto, as armaduras da ponte, não são dimensionadas, contabilizando esta situação de descalçamento da fundação.

Após o descalçamento total da sapata, ou seja, quando a mesma perde a totalidade das molas, o respetivo pilar fica suspenso, daí o aumento abruuto verificado dos momentos fletores na estrutura, levando a mesma ao colapso. No entanto, esta situação é irreal, uma vez que, para uma situação anterior, em que a sapata estivesse parcialmente descalça, a estrutura já teria colapsado.

8.2 TRABALHO FUTURO

No que refere ao trabalho futuro para o contínuo desenvolvimento do estudo, recomendam-se as seguintes linhas:

i) É necessário um número superior de ensaios laboratoriais, considerando uma maior diversidade de solos e de materiais combustíveis, para se obter uma previsão mais correta da variação da capacidade de infiltração potencial do solo, devido aos incêndios florestais.

ii) Com vista à calibração do modelo hidrológico da bacia hidrográfica é necessário a análise comparativa entre os hidrogramas de cheia simulados e hidrogramas de cheia observados num conjunto de bacias hidrográficas onde ocorreu um incêndio recentemente.

iii) A profundidade da cavidade de erosão junto a um pilar complexo obtida pela aplicação do HEC-18 fornece um valor máximo estimado em que a aferição do próprio modelo se baseou num conjunto limitado de ensaios físicos que tendem a cobrir um leque muito vasto de situações. Face a estas limitações é recomendável que seja realizado um ensaio físico em laboratório, com vista à obtenção da profundidade de erosão localizada junto de um pilar complexo com a geometria considerada no capítulo 7 e comparar a previsão obtida pela aplicação do HEC-18 com os resultados observados em laboratório.

iv) Realizar um modelo estrutural que tenha em conta as características do solo em que a estrutura está assente, ou seja, tratando o mesmo como um solo anisótropo, diferenciando o seu comportamento vertical e horizontalmente.

9. BIBLIOGRAFIA

Almeida, O.A. *Qualidade da Água de Irrigação*. Embrapa, Cruz das Almas-BA (2010). <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/875385/1/livroqualidadeagua.pdf>.

Arneson, L., Zevenbergen, L., Lagasse, P., Clopper, P. (2012). *Evaluating scour at bridges. Fifth edition*. FHWA-HIF-12-003, Hydraulic Engineering Circular No. 18. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Bowles, J., P, E., S.E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. Fifth Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc, Nova Iorque.

Cardoso, A.H. (1998). *Hidráulica Fluvial*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Castro, A., Meixedo, J., Vivas, A. (2010). *Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais – uma contribuição*. Industria e Ambiente 62-Solos, 2010, páginas, 26, 27 e 28, Publidústria, Porto.

Chow, V., Maidment, D., Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Singapore.

Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto. (1995). Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Diário da República – I Série-B, N.º194. Lisboa.

Dey S., Bose S. K., Sastry G. L. N. (1992). "Clear water scour at circular piers, part I: Flow model". Proceedings of 8th Congress of Asia and Pacific Division, IAHR, Pune, India. Vol.3, p.69 à 80.

E 196 - 1966 (1967). Especificação LNEC - Solos – *Análise granulométrica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

E 239 - 1970 (1971). Especificação LNEC - Solos – *Análise granulométrica por peneiração húmida*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

EN 1991-2 (2003). *Eurocode 1: Actions on structures- Part 2: Traffic loads on bridges*. European committee for standardization.

EN 1998-2 (2005). *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges*. European committee for standardization.

Ettema, R., Constantinescu, G., Melville, B. (2011). *Scour at wide piers and long skewed piers*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Rep. 682, Transportation Research Board, Washington, DC.

Estêvão, J. (2015). *Espectros de resposta – NP EN 1998-1_2010 – Versão beta 2.01*.

- Fael, C. M. S. (2007). *"Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção"*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- Faria, S.R.M. (2008). *Repelência à água em Solos Florestais queimados e não queimados na região Centro*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Gomes, A.C.S. (2012). *Risco de erosão numa área florestal ardida no Centro de Portugal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Higginson, B.; Jarnecke, J. (2007). *Salt Creek BAER-2007 Burned Area Emergency Response*. Provo, UT: Uinta National Forest; Hydrology Specialist Report. p. 11.
- Hubert J, Morel-Seytoux, James P. Verdin. (1981). *Extension of the Soil Conservation Service Rainfall*. Report no. FHWA/RD81/060. Federal Highway Administration. Washington DC.
- Kopp, E., Sobral, M., Soares, T., Woerner, M. (1989). *Os solos do Algarve e as suas Características*. Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação - DGHEA. Direção Regional de Agricultura do Algarve, DRAA. Sociedade Alemã de Cooperação Técnica. Faro, Portugal.
- Lança, R. (2000). *Contribuição para o Estudo de Cheias Recorrendo a um Modelo Distribuído*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora.
- Lança, R. (2013). *"Clear-water scour at single piers and pile groups"*. PhD thesis, University of Beira Interior. Covilhã, Portugal.
- Lança, R.; Rocheta, V.; Martins, F.; Fernandez, H.; Silva, E.; Pedras, C. (2014). *Modificação das propriedades hidráulicas dos solos da serra algarvia devido aos incêndios florestais*. In Lourenço, Luciano (Ed.), *Multidimensão e território de risco*, Imprensa da Universidade de Coimbra, pp. 715 – 719.
- Laranjeira, I., Leitão, T. (2008). *Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos. Análise do impacte dos fogos florestais na qualidade química das águas superficiais e subterrâneas das áreas de estudo da Região Centro*. 3.º Relatório de Progresso relativo ao ano de 2007. LNEC.
- Lencastre, A., Franco, F.M. (1992). *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- Lima, M. (2008). *Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes*. Engenharia Civil - UM, Número 22, 2008, páginas 41-52, Editor, Guimarães.
- Livingston, R., Earles, T., Wright, K. (2005). *Los Alamos Post-Fire Watershed Recovery: A Curve-Number-Based Evaluation*. *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts*: p. 1-11.
- Lourenço, L. (2007). *Incêndios florestais de 2003 e 2005. Tão perto no tempo e já tão longe na memória. Riscos Ambientais e Formação de Professores* (Actas das VI Jornadas Nacionais

do Prosepe), Colectâneas Cindínicas VII, Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, p. 19-91.

Lourenço, L., Lopes, N. (2004). *Incêndios Florestais, consequência e razão de ser de novas Mudanças Globais*. GeolNova, Lisboa, n.º 9, “Ambiente e Mudanças Globais”, p. 45-64.

Meneses, B.M.C.S. (2013). *Influência de um fogo florestal na qualidade da água da Ribeira de São Domingos localizada na Região Oeste de Portugal*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa.

Moody, J.; Kinner, D.; Úbeda, X. (2009). *Linking hydraulic properties of fire-affected soils to infiltration and water repellency*. Journal of Hydrology, 379, p.291-303, Philadelphia.

Moreno, M., Couto, L., Maia, R., Cardoso, A. (2014). *Erosões localizadas em Pilares Complexos de Pontes: Desempenho de Modelos de Previsão Existentes*. Recursos Hídricos, Vol 35, Nº1, maio/2014, páginas 5-22, Comissão de Editores Científicos Associados, Lisboa.

NP EN 1990 (2009). *Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas*. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1991-1-1 (2009). *Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. Instituto Português da Qualidade; Dezembro 2009.

NP EN 1991-1-4 (2010). *Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-4: Acções gerais - Acções do vento*. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1992-1-1 (2010). *Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade; Março 2010.

NP EN 1998-1 (2010). *Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade; Fevereiro 2010.

NP – 83 (1965). Norma Portuguesa Definitiva - Solos – *Determinação da densidade das partículas*. Repartição de Normalização. Lisboa.

NP – 84 (1965). Norma Portuguesa Definitiva - Solos – *Determinação do teor em água*. Repartição de Normalização. Lisboa.

Pereira, J., Oliveira, T., Paul, J. (1995). *Satellite-based estimation of mediterranean shrubland structural parameters*. EARSEL Advances in Remote Sensing Vol.4, No.3 – XII, Lisboa.

Pierce, J.L., Meyer, G.A., and Jull A.J.T. (2004). *Fire-induced erosion and millennial-scale climate change in northern ponderosa pine forests*. Nature, v. 432, 04/11/2004, p. 87-90, NaturePublishingGroup, Novo México.

Pinheiro, R. (2010). *Estudo Experimental da Erosão em Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.

Raudkivi, A. J. (1986), "Functional trends of scour at bridge piers". Journal of Hydraulic Engineering, 112 (1), p.1 à 13.

Reichert, J., e colaboradores. Solos Florestais. 2009. http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.queos.com.br/downloads/Disciplinas/SolosFlorestais/Apostila_Teorica%20SF.pdf. 09-11-2014.

Rocheta, V. (2011). *Perdas no Processo De Precipitação-Escoamento Em Zonas Urbanas – Estudo Da Infiltração Em Calçada À Portuguesa*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Évora.

Romane, F., Floret, C., Galan, M., Grandjanny, M., Floc'H, E., Maistre, M., Perret, P. (1988). *Quelques remarques sur les taillis de chênes verts. Répartition, histoire, biomasse*. Forêt méditerranéenne, t. X, n° 1, juillet, páginas 131-135.

Scharffenberg, W., Fleming, M. (2010). *Hydrologic Modeling Syztem HEC-HMS*. US Army Corps os Engineers, Davis, California.

Serrat, B., Lima, M., Garcias, C., Fantin, E., Carnieri, I., Pinto, L. *Conhecendo o Solo*. Novembro de 2002. <http://www.escola.agrarias.ufpr.br/arquivospdf/conhecendosolo.pdf>. 01-11-2014.

Silva, R. (2008). *Estudo da Erosão de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.

Stoof, C. (2011). *Fire effects on soil and hydrology*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Wageningen.

Teixeira, J. (2013). *Modelação Experimental de Erosões Localizadas Junto de Pilares Complexos*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.

Uva, J.S. *IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental em 1995, 2005 e 2010*. Fevereiro de 2013. <http://www.icnf.pt/portal/florestas/ifn/resource/ficheiros/ifn/ifn6-res-prelimv1-1>. 01-11-2014.

Viegas, D., Figueiredo, A., Almeida, M., Reva, V., Ribeiro, L., Viegas, M., Oliveira, R., Raposo, J. (2012). *Relatório do Incêndio Florestal de Tavira/São Brás de Alportel*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, ADAI/LAETA, Coimbra.

<http://earthexplorer.usgs.gov/> 03-03-2015.

<http://www.geotecnia.ufba.br/arquivos/ensaios/Aula%20de%20Laboratorio-%20Roteiro%20-%20Granulometria.pdf> 16-03-2015.

http://www.unifenas.br/pesquisa/download/ArtigosRev1_99/pag21-26.pdf 16-03-2015.

<http://www.cm-tavira.pt/site/content/camara-%C3%A1qua-rio/linhas-de-%C3%A1gua> 05-04-2015.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> 07-07-2015.


http://www.anuario.igeo.ufrj.br/anuario_1996/vol19_93_114.pdf 31-08-2015.


<http://www.esalq.usp.br/gerd/cons/SusceptEroSolo.pdf> 31-08-2015 31-08-2015.


http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuaria/erosao_do_solo/propriedades_do_solo.html 31-08-2015.


http://web.letras.up.pt/mapoteca/em%20portugu%C3%AAs/ARQUIVO/gest%C3%A3o_arquivo/outras%20colec%C3%A7%C3%B5es/Cartas%20dos%20Solos/lista%20cartas%20dos%20solos%20existentes%20na%20MAPoteca.pdf 16-03-2015.


ANEXOS


 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia							
AMOSTRAS Nº	Amostra Solo Ludo (Faro)	DATA					
A, B, C e D		16/03/2015					
TEOR EM ÁGUA: NP-84 (1965)							
Número do ensaio		A	B				
Número da cápsula		109	74	5	117A	20	7
m1	peso da cápsula (g)	11.27	19.87	12.00	11.30	11.73	9.99
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	61.69	34.34	56.82	34.82	33.88	67.45
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	61.30	34.12	56.51	34.58	33.66	67.07
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	50.03	14.25	44.51	23.28	21.93	57.08
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.39	0.22	0.31	0.24	0.22	0.38
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	0.78	1.54	0.70	1.03	1.00	0.67
W	teor em água médio (%)	0.74			0.90		
Número do ensaio		C			D		
Número da cápsula		99A	80	72	132	133	137
m1	peso da cápsula (g)	11.45	11.22	10.05	9.61	9.67	9.34
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	51.01	52.11	45.34	47.42	35.81	44.11
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	50.71	51.78	45.07	46.95	35.47	43.77
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	39.26	40.56	35.02	37.34	25.80	34.43
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.30	0.33	0.27	0.47	0.34	0.34
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	0.76	0.81	0.77	1.26	1.32	0.99
W	teor em água médio (%)	0.78			0.99		
OBSERVAÇÕES : A temperatura da estufa foi mantida a 60°C ± 2°C							
Ensaiou : Elisa Silva + Soraia Almeida		Cálculos : Elisa Silva			Verificação: Elisa Silva		

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia							
AMOSTRAS Nº	Amostra_Solo Ludo (Faro)	DATA					
A, B, C e D		16/03/2015					
TEOR EM ÁGUA NP - 84 (1965)							
Número do ensaio	A		B				
Número da cápsula	109	74	5	117A	20	7	
m1	peso da cápsula (g)	11.27	19.87	12.00	11.30	11.73	9.99
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	61.69	34.34	56.82	34.82	33.88	67.45
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	61.23	34.10	56.46	34.54	33.64	67.00
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	49.96	14.23	44.46	23.24	21.91	57.01
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.46	0.24	0.36	0.28	0.24	0.45
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	0.92	1.69	0.81	1.20	1.10	0.79
W	teor em água médio (%)	0.87			1.03		
Número do ensaio	C			D			
Número da cápsula	99A	80	72	132	133	137	
m1	peso da cápsula (g)	11.45	11.22	10.05	9.61	9.67	9.34
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	51.01	52.11	45.34	47.42	35.81	44.11
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	50.66	51.72	45.01	46.90	35.45	43.75
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	39.21	40.50	34.96	37.29	25.78	34.41
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.35	0.39	0.33	0.52	0.36	0.36
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	0.89	0.96	0.94	1.39	1.40	1.05
W	teor em água médio (%)	0.93			1.05		
OBSERVAÇÕES : A temperatura da estufa foi mantida a 100°C ± 2°C							
Ensaiou : Elisa Silva + Soraia Almeida		Cálculos : Elisa Silva			Verificação: Elisa Silva		


 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia							
AMOSTRAS Nº	Amostra_ Solo Ludo (Faro)	DATA					
A, B, C e D		16/03/2015					
TEOR EM AGUA NP - 84 (1965)							
Número do ensaio		A	B				
Número da cápsula		109	74	5	117A	20	7
m1	peso da cápsula (g)	11.27	19.87	12.00	11.30	11.73	9.99
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	61.69	34.34	56.82	34.82	33.88	67.45
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	60.28	33.71	55.78	34.16	33.27	66.08
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	49.01	13.84	43.78	22.86	21.54	56.09
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	1.41	0.63	1.04	0.66	0.61	1.37
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	2.88	4.55	2.38	2.89	2.83	2.44
W	teor em água médio (%)	2.63			2.72		
Número do ensaio		C			D		
Número da cápsula		99A	80	72	132	133	137
m1	peso da cápsula (g)	11.45	11.22	10.05	9.61	9.67	9.34
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	51.01	52.11	45.34	47.42	35.81	44.11
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	50.20	51.16	44.61	46.03	34.85	43.15
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	38.75	39.94	34.56	36.42	25.18	33.81
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.81	0.95	0.73	1.39	0.96	0.96
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	2.09	2.38	2.11	3.82	3.81	2.84
W	teor em água médio (%)	2.19			2.84		
OBSERVAÇÕES : A temperatura da estufa foi mantida a 240°C ± 2°C							
Ensaiou : Elisa Silva + Soraia Almeida		Cálculos : Elisa Silva			Verificação: Elisa Silva		

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia							
AMOSTRAS Nº	Amostra Solo Ludo (Faro)	DATA					
A, B, C e D		06/03/15					
TEOR EM ÁGUA PÓS-INCÊNDIO: NP-84 (1965)							
Número do ensaio	A	A	A	B	B	B	
Número da cápsula	135	138	140	68	80	84	
m1	peso da cápsula (g)	9.35	9.68	9.38	10.14	10.03	10.06
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	51.76	51.05	56.77	48.77	48.61	47.52
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	51.38	50.75	56.41	48.60	48.36	47.31
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	42.03	41.07	47.03	38.46	38.33	37.25
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.38	0.30	0.36	0.17	0.25	0.21
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	0.90	0.73	0.77	0.44	0.65	0.56
W	teor em água médio (%)	0.80			0.55		
Número do ensaio	C	C	C	D	D	D	
Número da cápsula	130	131	132	133	134	137	
m1	peso da cápsula (g)	9.25	9.31	9.65	9.69	9.46	9.38
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	59.29	50.09	50.81	50.60	58.13	54.28
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	59.04	49.80	50.51	50.48	57.90	54.11
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	49.79	40.49	40.86	40.79	48.44	44.73
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.25	0.29	0.30	0.12	0.23	0.17
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	0.50	0.72	0.73	0.29	0.47	0.38
W	teor em água médio (%)	0.65			0.38		
OBSERVAÇÕES :							
Ensaiou : Elisa Silva							
Cálculos : Elisa Silva							
Verificação: Elisa Silva							


 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia													
Data:	Amostra_ Solo Ludo (Faro)												
18/04/2015													
Determinação de matéria Orgânica - Método de Ignição (Estufa a 240°C)													
	Número da Cápsula												
	109 74 5 117A 20 7 99A 80 72 132 133 137												
m ₁	massa da cápsula (g)	11.27	19.87	12.00	11.30	11.73	9.99	11.45	11.22	10.05	9.61	9.67	9.34
m ₂	massa da cápsula + solo (g) T ambiente=18°C	61.69	34.34	56.82	34.82	33.88	67.45	51.01	52.11	45.34	47.42	35.81	44.11
m ₃	massa da cápsula + solo (g) T estufa=(60±2)°C	61.30	34.12	56.51	34.58	33.66	67.07	50.71	51.78	45.07	46.95	35.47	43.77
m ₄	massa da cápsula + solo (g) T estufa=(103±2)°C	61.23	34.10	56.46	34.54	33.64	67.00	50.66	51.72	45.01	46.90	35.45	43.75
m ₅	massa da cápsula + solo (g) T estufa=(240±2)°C	60.28	33.71	55.78	34.16	33.27	66.08	50.20	51.16	44.61	46.03	34.85	43.15
m (60°C)	m ₂ -m ₃	0.39	0.22	0.31	0.24	0.22	0.38	0.30	0.33	0.27	0.47	0.34	0.34
m (100°C)	m ₂ -m ₄	0.46	0.24	0.36	0.28	0.24	0.45	0.35	0.39	0.33	0.52	0.36	0.36
m (240°C)	m ₂ -m ₅	1.41	0.63	1.04	0.66	0.61	1.37	0.81	0.95	0.73	1.39	0.96	0.96
% MOS (240°C)	100*((m ₄ -m ₅)/(m ₄ -m ₁))	1.90	2.74	1.53	1.64	1.69	1.61	1.17	1.38	1.14	2.33	2.33	1.74
% MOS média (240°C)		1.64											
MOS (240°C) g/kg	((m ₄ -m ₅)*1000)/(m ₄ -m ₁)	19.02	27.41	15.29	16.35	16.89	16.14	11.73	13.83	11.44	23.33	23.27	17.44
MOS média (240°C) g/kg		16.42											
Comentário: os valores das células assinaladas não foram considerados para as médias.													
Os valores registados são relativamente baixos, visto que a estufa atingiu apenas os 240°C, tendo-se tido como valor de referência a massa do solo a 100°C. De qualquer modo, valores superiores da temperatura iriam não só queimar a matéria orgânica existente no solo como também eliminar a água adsorvida existentes entre as partículas finas da argila, obtendo-se valores superiores de MOS, embora supra-estimados de acordo com diversas fontes bibliográficas. Estes valores carecem de confirmação com outros métodos de determinação da MOS.													
ENSAIOU : Elisa Silva	CALCULOU : Elisa Silva	VERIFICOU: Elisa Silva											

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia					
AMOSTRAS Nº	Amostra _Solo da Serra (Alportel)	DATA			
A, B, C e D		07/22/14			
TEOR EM ÁGUA PÓS-INCÊNDIO: NP-84 (1965)					
Número do ensaio		A	A	B	B
Número da cápsula		130	139	62A	109
m1	peso da cápsula (g)	9.25	9.33	20.19	11.30
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	49.50	59.93	63.10	61.68
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	48.61	58.59	62.25	60.68
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	39.36	49.26	42.06	49.38
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.89	1.34	0.85	1.00
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	2.26	2.72	2.02	2.03
W	teor em água médio (%)	2.49		2.02	
Número do ensaio		C	C	D	D
Número da cápsula		121	20	22	26
m1	peso da cápsula (g)	11.15	11.77	11.11	11.22
m2	peso da cápsula + solo húmido (g)	53.33	56.02	51.72	57.79
m3	peso da cápsula + solo seco (g)	52.58	55.30	50.47	57.08
$W_s = m_3 - m_1$	peso do solo seco (g)	41.43	43.53	39.36	45.86
$W_w = m_2 - m_3$	peso da água (g)	0.75	0.72	1.25	0.71
$(W_w / W_s) \times 100$	teor em água (%)	1.81	1.65	3.18	1.55
W	teor em água médio (%)	1.73		1.55	
OBSERVAÇÕES : O teor em água da amostra D, correspondente à cápsula nº22 apresenta problemas, daí não ter sido contabilizada na média.					
Ensaiou : Elisa Silva		Cálculos : Elisa Silva		Verificação: Elisa Silva	


 UAIG ISE <small>UNIVERSIDADE DO ALGARVE INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA</small>		Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia		
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO HÚMIDA				
(E239 - 1970) do LNEC				
DATA	AMOSTRA 1_Solo Ludo (Faro)			
23/04/2015				
MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g)			mt = 1923.00	
MASSA RETIDA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)			m10 = 56.76	
MASSA PASSADA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)			m̄10 = 1866.24	
FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
PENEIROS	MASSA RETIDA (g) mx	% RETIDA Nx = (mx / mt) x 100	% ACUMULADA RETIDA N̄x	% ACUMULADA QUE PASSA N̄x = 100 - Nx
# 3 --> 76.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 2 --> 50.8 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 1 1/2 --> 38.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 1 --> 25.4 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 3/4 --> 19.0 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 3/8 --> 9.51 mm	22.16	1.15	1.15	98.8
# 4 --> 4.76 mm	15.66	0.81	1.97	98.0
# 10 --> 2.00 mm	18.94	0.98	2.95	97.0
< 2.0 mm	1866.24	97.05	----	----
TOTAL	1923.00	100.00	---	---
FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
			$\bar{N}_{10} = \bar{m}_{10} \times 100 = 97.05$	
MASSA AMOSTRA A ENSAIAR	mg = 100.33	m t		
PENEIROS	MASSA RETIDA (g) mx	% RETIDA Nx = (mx / mg) x N̄10	% ACUMULADA RETIDA N̄x	% ACUMULADA QUE PASSA N̄x = 100 - Nx
# 20 --> 0.850 mm	20.09	19.43	22.38	77.6
# 40 --> 0.425 mm	15.88	15.36	37.75	62.3
# 60 --> 0.250 mm	23.51	22.74	60.49	39.5
#140 --> 0.106 mm	18.03	17.44	77.93	22.1
#200 --> 0.075 mm	3.54	3.42	81.35	18.6
< 0.075 mm	19.28	18.65	100.00	----
TOTAL	100.33	97.05	---	---
ENSAIOU :	CALCULOU :		VERIFICOU:	
Elisa Silva e Soraia Almeida	Elisa Silva e Soraia Almeida		Elisa Silva e Soraia Almeida	


		Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia		
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO HÚMIDA (E239 - 1970) do LNEC				
DATA	AMOSTRA 1_Solo Serra (Alportel)			
05/09/2014				
MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g)	mt = 3870.00			
MASSA RETIDA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)	m10 = 1878.25			
MASSA PASSADA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)	m̄10 = 1991.75			
FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
PENEIROS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA QUE PASSA
	mx	$N_x = (m_x / m_t) \times 100$	\bar{N}_x	$\bar{N}_x = 100 - \bar{N}_x$
# 3 --> 76.1 m	0.00	0.00	0.00	100.0
# 2 --> 50.8 m	0.00	0.00	0.00	100.0
# 11/2 --> 38.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 1 --> 25.4 m	135.93	3.51	3.51	96.5
# 3/4 --> 19.0 mm	206.42	5.33	8.85	94.7
# 3/8 --> 9.51 mm	630.96	16.30	25.15	83.7
# 4 --> 4.76 m	520.51	13.45	38.60	61.4
# 10 --> 2.00 mm	384.43	9.93	48.53	51.5
< 2.0 mm	1991.75	51.47	-----	-----
TOTAL	3870.00	100.00	-----	-----
FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
			$\bar{N}_{10} = \bar{m}_{10} \times 100 = 51.47$	
MASSA AMOSTRA A ENSAIAR mg : 88.20		m t		
PENEIROS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA QUE PASSA
	mx	$N_x = (m_x / m_g) \times \bar{N}_{10}$	\bar{N}_x	$\bar{N}_x = 100 - \bar{N}_x$
# 20 --> 0.850 mm	13.44	7.84	56.38	43.6
# 40 --> 0.425 mm	7.41	4.32	60.70	39.3
# 60 --> 0.250 mm	4.52	2.64	63.34	36.7
#140 --> 0.106 mm	6.96	4.06	67.40	32.6
#200 --> 0.075 mm	2.56	1.49	68.89	31.1
< 0.075 mm	53.31	31.11	100.00	-----
TOTAL	88.20	51.47	-----	-----
ENSAIOU :	CALCULOU :		VERIFICOU:	
Elisa Silva	Elisa Silva		Elisa Silva	


 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia																																																																																					
DATA	Amostra_Solo Ludo (Faro)																																																																																				
24/04/2015																																																																																					
Pesos Volúmicos e Porosidade																																																																																					
DETERMINAÇÃO DOS PESOS VOLÚMICOS																																																																																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Provetes metálicos</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_1</td> <td>Massa do provete (g)</td> <td>689.9</td> <td>683.3</td> <td>690.5</td> <td>700.4</td> </tr> <tr> <td>m_2</td> <td>Massa do provete + solo seco estufa 100°C</td> <td>1889.7</td> <td>1909.2</td> <td>1595.3</td> <td>1642.9</td> </tr> <tr> <td>m_3</td> <td>Massa do provete + solo húmido (g)</td> <td>1954.6</td> <td>1974.3</td> <td>1668.3</td> <td>1696.8</td> </tr> <tr> <td>m_4</td> <td>Massa do provete + solo saturado (g)</td> <td>2084.0</td> <td>2088.6</td> <td>1894.4</td> <td>1928.3</td> </tr> <tr> <td>$m_5=m_2-m_1$</td> <td>Massa do solo seco estufa 100°C (g)</td> <td>1199.8</td> <td>1225.9</td> <td>904.8</td> <td>942.5</td> </tr> <tr> <td>$m_6=m_3-m_1$</td> <td>Massa do solo húmido (g)</td> <td>1264.7</td> <td>1291.0</td> <td>977.8</td> <td>996.4</td> </tr> <tr> <td>$m_7=m_4-m_1$</td> <td>Massa do solo saturado (g)</td> <td>1394.1</td> <td>1405.3</td> <td>1203.9</td> <td>1227.9</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>Diâmetro dos provetes (m)</td> <td>7.4</td> <td>7.4</td> <td>7.4</td> <td>7.4</td> </tr> <tr> <td>h</td> <td>Altura dos provetes (m)</td> <td>14.1</td> <td>14.1</td> <td>14.1</td> <td>14.2</td> </tr> <tr> <td>$V_T=h(\pi d^2/4)$</td> <td>Volume dos provetes (m³)</td> <td>606.4</td> <td>606.4</td> <td>606.4</td> <td>610.7</td> </tr> <tr> <td>$\gamma_d=g.m_5/V_T$</td> <td>Peso volúmico seco (kN/m³)</td> <td>19.41</td> <td>19.83</td> <td>14.64</td> <td>15.14</td> </tr> <tr> <td>$\gamma_h=g.m_6/V_T$</td> <td>Peso volúmico húmido (kN/m³)</td> <td>20.46</td> <td>20.88</td> <td>15.82</td> <td>16.01</td> </tr> <tr> <td>$\gamma_{sat}=g.m_7/V_T$</td> <td>Peso volúmico saturado (kN/m³)</td> <td>22.55</td> <td>22.73</td> <td>19.48</td> <td>19.72</td> </tr> </tbody> </table>		Provetes metálicos	A	B	C	D	m_1	Massa do provete (g)	689.9	683.3	690.5	700.4	m_2	Massa do provete + solo seco estufa 100°C	1889.7	1909.2	1595.3	1642.9	m_3	Massa do provete + solo húmido (g)	1954.6	1974.3	1668.3	1696.8	m_4	Massa do provete + solo saturado (g)	2084.0	2088.6	1894.4	1928.3	$m_5=m_2-m_1$	Massa do solo seco estufa 100°C (g)	1199.8	1225.9	904.8	942.5	$m_6=m_3-m_1$	Massa do solo húmido (g)	1264.7	1291.0	977.8	996.4	$m_7=m_4-m_1$	Massa do solo saturado (g)	1394.1	1405.3	1203.9	1227.9	d	Diâmetro dos provetes (m)	7.4	7.4	7.4	7.4	h	Altura dos provetes (m)	14.1	14.1	14.1	14.2	$V_T=h(\pi d^2/4)$	Volume dos provetes (m ³)	606.4	606.4	606.4	610.7	$\gamma_d=g.m_5/V_T$	Peso volúmico seco (kN/m ³)	19.41	19.83	14.64	15.14	$\gamma_h=g.m_6/V_T$	Peso volúmico húmido (kN/m ³)	20.46	20.88	15.82	16.01	$\gamma_{sat}=g.m_7/V_T$	Peso volúmico saturado (kN/m ³)	22.55	22.73	19.48	19.72
	Provetes metálicos	A	B	C	D																																																																																
m_1	Massa do provete (g)	689.9	683.3	690.5	700.4																																																																																
m_2	Massa do provete + solo seco estufa 100°C	1889.7	1909.2	1595.3	1642.9																																																																																
m_3	Massa do provete + solo húmido (g)	1954.6	1974.3	1668.3	1696.8																																																																																
m_4	Massa do provete + solo saturado (g)	2084.0	2088.6	1894.4	1928.3																																																																																
$m_5=m_2-m_1$	Massa do solo seco estufa 100°C (g)	1199.8	1225.9	904.8	942.5																																																																																
$m_6=m_3-m_1$	Massa do solo húmido (g)	1264.7	1291.0	977.8	996.4																																																																																
$m_7=m_4-m_1$	Massa do solo saturado (g)	1394.1	1405.3	1203.9	1227.9																																																																																
d	Diâmetro dos provetes (m)	7.4	7.4	7.4	7.4																																																																																
h	Altura dos provetes (m)	14.1	14.1	14.1	14.2																																																																																
$V_T=h(\pi d^2/4)$	Volume dos provetes (m ³)	606.4	606.4	606.4	610.7																																																																																
$\gamma_d=g.m_5/V_T$	Peso volúmico seco (kN/m ³)	19.41	19.83	14.64	15.14																																																																																
$\gamma_h=g.m_6/V_T$	Peso volúmico húmido (kN/m ³)	20.46	20.88	15.82	16.01																																																																																
$\gamma_{sat}=g.m_7/V_T$	Peso volúmico saturado (kN/m ³)	22.55	22.73	19.48	19.72																																																																																
DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE																																																																																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Provetes metálicos</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G</td> <td>Densidade das partículas sólidas do solo</td> <td>2.59</td> <td>2.59</td> <td>2.59</td> <td>2.59</td> </tr> <tr> <td>e_d</td> <td>Índice de vazios do solo seco</td> <td>0.31</td> <td>0.28</td> <td>0.74</td> <td>0.68</td> </tr> <tr> <td>e_{sat}</td> <td>Índice de vazios do solo saturado</td> <td>0.22</td> <td>0.21</td> <td>0.61</td> <td>0.57</td> </tr> <tr> <td>$e_{médio}$</td> <td>Índice de vazios do solo</td> <td>0.27</td> <td>0.24</td> <td>0.67</td> <td>0.63</td> </tr> <tr> <td>$n=e/(1+e)$</td> <td>Porosidade do solo (%)</td> <td>21.05</td> <td>19.62</td> <td>40.29</td> <td>38.49</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">20</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">39</td> </tr> </tbody> </table>		Provetes metálicos	A	B	C	D	G	Densidade das partículas sólidas do solo	2.59	2.59	2.59	2.59	e_d	Índice de vazios do solo seco	0.31	0.28	0.74	0.68	e_{sat}	Índice de vazios do solo saturado	0.22	0.21	0.61	0.57	$e_{médio}$	Índice de vazios do solo	0.27	0.24	0.67	0.63	$n=e/(1+e)$	Porosidade do solo (%)	21.05	19.62	40.29	38.49			20		39																																											
	Provetes metálicos	A	B	C	D																																																																																
G	Densidade das partículas sólidas do solo	2.59	2.59	2.59	2.59																																																																																
e_d	Índice de vazios do solo seco	0.31	0.28	0.74	0.68																																																																																
e_{sat}	Índice de vazios do solo saturado	0.22	0.21	0.61	0.57																																																																																
$e_{médio}$	Índice de vazios do solo	0.27	0.24	0.67	0.63																																																																																
$n=e/(1+e)$	Porosidade do solo (%)	21.05	19.62	40.29	38.49																																																																																
		20		39																																																																																	
OBSERVAÇÕES :																																																																																					
As amostras foram obtidas por cravação dos provetes metálicos no terreno. Os provetes foram acondicionados para o transporte e para manter as características iniciais.																																																																																					
As amostras foram recolhidas no campo, na capa de terreno mais superficial, contendo algum material orgânico, nomeadamente raízes de plantas. As amostras A e B foram retiradas de um local e as amostras C e D de outro local, embora não distem mais do que 5 metros.																																																																																					
Os provetes foram pesados assim que chegaram ao laboratório, tendo sido posteriormente embebidos em água, durante 4 dias.																																																																																					
A massa do solo seco foi determinada após a amostra ficar 48 horas em estufa a 102°C±3°C																																																																																					


 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia																																																																							
DATA	Amostra 2_Solo Serra (Alportel)																																																																						
02/05/2015																																																																							
Pesos Volúmicos e Porosidade																																																																							
DETERMINAÇÃO DOS PESOS VOLÚMICOS																																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Provetes metálicos</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_1 Massa do provete (g)</td> <td>684.4</td> <td>678.9</td> <td>687.3</td> <td>697.7</td> </tr> <tr> <td>m_2 Massa do provete + solo seco estufa 100°C</td> <td>1357.4</td> <td>1455.1</td> <td>1505.7</td> <td>1557.2</td> </tr> <tr> <td>m_3 Massa do provete + solo húmido (g)</td> <td>1460.9</td> <td>1564.1</td> <td>1635.6</td> <td>1690.7</td> </tr> <tr> <td>m_4 Massa do provete + solo saturado (g)</td> <td>1736.2</td> <td>1786.4</td> <td>1824.1</td> <td>1863.4</td> </tr> <tr> <td>$m_5 = m_2 - m_1$ Massa do solo seco estufa 100°C (g)</td> <td>673.0</td> <td>776.2</td> <td>818.4</td> <td>859.5</td> </tr> <tr> <td>$m_6 = m_3 - m_1$ Massa do solo húmido (g)</td> <td>776.5</td> <td>885.2</td> <td>948.3</td> <td>993.0</td> </tr> <tr> <td>$m_7 = m_4 - m_1$ Massa do solo saturado (g)</td> <td>1051.8</td> <td>1107.5</td> <td>1136.8</td> <td>1165.7</td> </tr> <tr> <td>d Diâmetro dos provetes (m)</td> <td>7.4</td> <td>7.4</td> <td>7.4</td> <td>7.4</td> </tr> <tr> <td>h Altura dos provetes (m)</td> <td>14.1</td> <td>14.1</td> <td>14.1</td> <td>14.2</td> </tr> <tr> <td>$V_T = h(\pi d^2/4)$ Volume dos provetes (m³)</td> <td>606.4</td> <td>606.4</td> <td>606.4</td> <td>610.7</td> </tr> <tr> <td>$\gamma_d = g \cdot m_5 / V_T$ Peso volúmico seco (kN/m³)</td> <td>10.89</td> <td>12.56</td> <td>13.24</td> <td>13.81</td> </tr> <tr> <td>$\gamma_h = g \cdot m_6 / V_T$ Peso volúmico húmido (kN/m³)</td> <td>12.56</td> <td>14.32</td> <td>15.34</td> <td>15.95</td> </tr> <tr> <td>$\gamma_{sat} = g \cdot m_7 / V_T$ Peso volúmico saturado (kN/m³)</td> <td>17.02</td> <td>17.92</td> <td>18.39</td> <td>18.73</td> </tr> </tbody> </table>	Provetes metálicos	A	B	C	D	m_1 Massa do provete (g)	684.4	678.9	687.3	697.7	m_2 Massa do provete + solo seco estufa 100°C	1357.4	1455.1	1505.7	1557.2	m_3 Massa do provete + solo húmido (g)	1460.9	1564.1	1635.6	1690.7	m_4 Massa do provete + solo saturado (g)	1736.2	1786.4	1824.1	1863.4	$m_5 = m_2 - m_1$ Massa do solo seco estufa 100°C (g)	673.0	776.2	818.4	859.5	$m_6 = m_3 - m_1$ Massa do solo húmido (g)	776.5	885.2	948.3	993.0	$m_7 = m_4 - m_1$ Massa do solo saturado (g)	1051.8	1107.5	1136.8	1165.7	d Diâmetro dos provetes (m)	7.4	7.4	7.4	7.4	h Altura dos provetes (m)	14.1	14.1	14.1	14.2	$V_T = h(\pi d^2/4)$ Volume dos provetes (m ³)	606.4	606.4	606.4	610.7	$\gamma_d = g \cdot m_5 / V_T$ Peso volúmico seco (kN/m ³)	10.89	12.56	13.24	13.81	$\gamma_h = g \cdot m_6 / V_T$ Peso volúmico húmido (kN/m ³)	12.56	14.32	15.34	15.95	$\gamma_{sat} = g \cdot m_7 / V_T$ Peso volúmico saturado (kN/m ³)	17.02	17.92	18.39	18.73
Provetes metálicos	A	B	C	D																																																																			
m_1 Massa do provete (g)	684.4	678.9	687.3	697.7																																																																			
m_2 Massa do provete + solo seco estufa 100°C	1357.4	1455.1	1505.7	1557.2																																																																			
m_3 Massa do provete + solo húmido (g)	1460.9	1564.1	1635.6	1690.7																																																																			
m_4 Massa do provete + solo saturado (g)	1736.2	1786.4	1824.1	1863.4																																																																			
$m_5 = m_2 - m_1$ Massa do solo seco estufa 100°C (g)	673.0	776.2	818.4	859.5																																																																			
$m_6 = m_3 - m_1$ Massa do solo húmido (g)	776.5	885.2	948.3	993.0																																																																			
$m_7 = m_4 - m_1$ Massa do solo saturado (g)	1051.8	1107.5	1136.8	1165.7																																																																			
d Diâmetro dos provetes (m)	7.4	7.4	7.4	7.4																																																																			
h Altura dos provetes (m)	14.1	14.1	14.1	14.2																																																																			
$V_T = h(\pi d^2/4)$ Volume dos provetes (m ³)	606.4	606.4	606.4	610.7																																																																			
$\gamma_d = g \cdot m_5 / V_T$ Peso volúmico seco (kN/m ³)	10.89	12.56	13.24	13.81																																																																			
$\gamma_h = g \cdot m_6 / V_T$ Peso volúmico húmido (kN/m ³)	12.56	14.32	15.34	15.95																																																																			
$\gamma_{sat} = g \cdot m_7 / V_T$ Peso volúmico saturado (kN/m ³)	17.02	17.92	18.39	18.73																																																																			
DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE																																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Provetes metálicos</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G Densidade das partículas sólidas do solo</td> <td>2.53</td> <td>2.53</td> <td>2.53</td> <td>2.53</td> </tr> <tr> <td>e_d Índice de vazios do solo seco</td> <td>1.28</td> <td>0.98</td> <td>0.87</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>e_{sat} Índice de vazios do solo saturado</td> <td>1.08</td> <td>0.85</td> <td>0.75</td> <td>0.68</td> </tr> <tr> <td>$e_{médio}$ Índice de vazios do solo</td> <td>1.18</td> <td>0.91</td> <td>0.81</td> <td>0.74</td> </tr> <tr> <td>$n = e / (1 + e)$ Porosidade do solo (%)</td> <td>54.16</td> <td>47.75</td> <td>44.81</td> <td>42.55</td> </tr> <tr> <td></td> <td>**</td> <td colspan="3">45</td> </tr> </tbody> </table>	Provetes metálicos	A	B	C	D	G Densidade das partículas sólidas do solo	2.53	2.53	2.53	2.53	e_d Índice de vazios do solo seco	1.28	0.98	0.87	0.80	e_{sat} Índice de vazios do solo saturado	1.08	0.85	0.75	0.68	$e_{médio}$ Índice de vazios do solo	1.18	0.91	0.81	0.74	$n = e / (1 + e)$ Porosidade do solo (%)	54.16	47.75	44.81	42.55		**	45																																					
Provetes metálicos	A	B	C	D																																																																			
G Densidade das partículas sólidas do solo	2.53	2.53	2.53	2.53																																																																			
e_d Índice de vazios do solo seco	1.28	0.98	0.87	0.80																																																																			
e_{sat} Índice de vazios do solo saturado	1.08	0.85	0.75	0.68																																																																			
$e_{médio}$ Índice de vazios do solo	1.18	0.91	0.81	0.74																																																																			
$n = e / (1 + e)$ Porosidade do solo (%)	54.16	47.75	44.81	42.55																																																																			
	**	45																																																																					
OBSERVAÇÕES :																																																																							
As amostras foram obtidas por cravação dos provetes metálicos no terreno. Os provetes foram acondicionados para o transporte e para manter as características iniciais.																																																																							
A amostra A foi retirada de uma zona com maior camada de coberto vegetal, contendo maior quantidade de material orgânico. As amostras B, C e D foram retiradas de outra zona, a escassos metros do anterior, mas sem tanta matéria orgânica. Na recolha observou-se que a escassos centímetros de profundidade surgiam fragmentos de xisto, provenientes da desagregação do substrato rochoso.																																																																							
Os provetes foram pesados assim que chegaram ao laboratório, tendo sido posteriormente embebidos em água, durante 4 dias.																																																																							
A massa do solo seco foi determinada após a amostra ficar 48 horas em estufa a 102°C±3°C																																																																							
ENSAIOU :	CALCULOU E VERIFICOU :																																																																						
Elisa Silva e Soraia Almeida	Elisa Silva e Soraia Almeida																																																																						


 UAIG ISE <small>UNIVERSIDADE DO ALGARVE INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA</small>		Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia	
DATA	Amostra_Solo Ludo (Faro)		
24/04/2015			
DENSIDADE DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS: NP-83 (1965)			
CALIBRAGEM DO PICNOMETRO			
Número do Picnómetro		7	17
m_1	Massa do picnómetro (g)	43.62	46.64
m_2	Massa do picnómetro + água à temperatura T_1 (g)	144.77	147.53
T_1	Temperatura da água destilada isenta de ar (° C)	19.4	19.4
T_x	Temperatura da mistura solo + água (° C)	20.7	21.6
d^{T_1}	Densidade da água à temperatura T_1 (tabela)	0.998350	0.998350
d^{T_x}	Densidade da água à temperatura T_x (tabela)	0.998083	0.997888
$m_3 = A(m_2 - m_1) + m_1$	(Massa do picnómetro + água)		
sendo $A = (d^{T_x} / d^{T_1})$	à temperatura T_x (g)	144.74	147.48
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE			
Número da Cápsula		7	17
m_6	Massa da cápsula (g)	133.85	174.40
m_7	Massa da cápsula + solo seco (g)	158.85	199.40
$m_4 = m_7 - m_6$	Massa do solo seco (g)	25.00	25.00
m_5	Peso do picnómetro + mistura à temperatura T_x (g)	160.05	162.83
K	Quociente entre a densidade da água à temperatura T_x e a 20°C (tabela)	1.000000	1.000000
$d = K \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)}$	Densidade das Partículas	2.58	2.59
		2.58	
OBSERVAÇÕES :	Modo de realização do ensaio :		
	Com secagem prévia da amostra de solo		
	Fracção granulométrica :		
	Com dimensões inferiores a 4.76 mm (#4)		
ENSAIOU :	CALCULOU :		
Elisa Silva e Soraia Almeida	Elisa Silva	Elisa Silva e Soraia Almeida	

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia	
DATA	Amostra 2_Solo Serra (Alportel)
02/05/2015	
DENSIDADE DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS: NP-83 (1965)	
CALIBRAGEM DO PICNOMETRO	
Número do Picnómetro	65 69
m_1	Massa do picnómetro (g) 44.25 45.05
m_2	Massa do picnómetro + água à temperatura T_1 (g) 145.75 145.54
T_1	Temperatura da água destilada isenta de ar ($^{\circ}$ C) 19.2 19.4
T_x	Temperatura da mistura solo + água ($^{\circ}$ C) 28.0 27.2
d^{T_1}	Densidade da água à temperatura T_1 (tabela) 0.998390 0.998350
d^{T_x}	Densidade da água à temperatura T_x (tabela) 0.996260 0.996484
$m_3 = A(m_2 - m_1) + m_1$	(Massa do picnómetro + água)
sendo $A = (d^{T_x} / d^{T_1})$	à temperatura T_x (g)
	145.53 145.35
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	
Número da Cápsula	C23 C19
m_6	Massa da cápsula (g) 9.43 9.28
m_7	Massa da cápsula + solo seco (g) 34.43 34.28
$m_4 = m_7 - m_6$	Massa do solo seco (g) 25.00 25.00
m_5	Peso do picnómetro + mistura à temperatura T_x (g) 160.72 160.46
K	Quociente entre a densidade da água à temperatura T_x e a 20° C (tabela) 0.998 0.998
$d = K \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)}$	Densidade das Partículas
	2.54 2.52
	2.53
OBSERVAÇÕES :	Modo de realização do ensaio :
	Com secagem prévia da amostra de solo
	Fracção granulométrica :
	Com dimensões inferiores a 4.76 mm (#4)
	A amostra continha algumas partículas orgânicas. Com os 10 minutos de ebulição as partículas soltaram-se e depositaram-se à superfície.
ENSAIOU :	CALCULOU :
Elisa Silva e Soraia Almeida	Elisa Silva
	VEF
	Elisa Silva e Soraia Almeida

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia				
ANALISE GRANULOMÉTRICA (E196 - 1966) do LNEC				
DATA 05/05/2015	AMOSTRA 2_Solo Ludo (Faro)			
MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g)	$m_t = 1530.00$			
MASSA RETIDA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)	$m_{10} = 41.10$			
MASSA PASSADA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)	$\bar{m}_{10} = 1488.90$			
FRAÇÃO RETIDA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
PENEIROS	MASSA RETIDA (g) m_x	% RETIDA $N_x = (m_x / m_t) \times 100$	% ACUMULADA RETIDA \bar{N}_x	% ACUMULADA QUE PASSA $\bar{N}_x = 100 - N_x$
# 3 --> 76.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 2 --> 50.8 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 11/2 --> 38.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 1 --> 25.4 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 3/4 --> 19.0 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 3/8 --> 9.51 mm	10.93	0.71	0.71	99.3
# 4 --> 4.76 mm	12.18	0.80	1.51	98.5
# 10 --> 2.00 mm	17.99	1.18	2.69	97.3
< 2.0 mm	1488.90	97.31	---	---
TOTAL	1530.00	100.00	---	---
FRAÇÃO PASSADA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)		$\bar{N}_{10} = \bar{m}_{10} \times 100 = 97.31$		
MASSA AMOSTRA A ENSAIAR $m_g = 98.91$		m_t		
PENEIROS	MASSA RETIDA (g) m_x	% RETIDA $N_x = (m_x / m_g) \times \bar{N}_{10}$	% ACUMULADA RETIDA \bar{N}_x	% ACUMULADA QUE PASSA $\bar{N}_x = 100 - N_x$
# 20 --> 0.850 mm	22.40	22.04	24.72	75.3
# 40 --> 0.425 mm	18.80	18.50	43.22	56.8
# 60 --> 0.250 mm	22.62	22.25	65.48	34.5
#140 --> 0.106 mm	15.27	15.02	80.50	19.5
#200 --> 0.075 mm	3.32	3.27	83.77	16.2
< 0.075 mm	16.50	16.23	100.00	---
TOTAL	98.91	97.31	---	---
Observação: A amostra passada no peneiro de 2,00mm foi aquecida durante 10 minutos e esteve no agitador de partículas durante 15 minutos.				
ENSAIOU : Elisa Silva e Soraia Almeida		CALCULOU : Elisa Silva e Soraia Almeida		VERIFICOU: Elisa Silva e Soraia Almeida

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia											
DATA		Amostra 2_Solo Ludo (Faro)									
05/05/2015											
Nº da Proveta	C	Provete seco ao ar	$m_a = 99.4$ g								
Nº do Densímetro	98615	Teor em Água Higroscópica (NP-84)									
Antifloculante	Hexametáfosfato de sódio	Cápsula nº									
		Peso cápsula	Peso solo seco ao ar								
		P_{cap} [g]	$P_{cap+solo ar}$ [g]								
		137	9.38								
			21.44								
			21.38								
			0.50								
Correcções	Menis $C_M = 0.0005$										
	Antifloculante $C = 0.00390$	Provete seco	$m_b = m_a \cdot \frac{100}{100 + \omega_A} = 98.91$ g								
Densidade das Partículas (NP-83)	2.58										
Temperatura média do ensaio T [°C]	23.0	PRÉ-TRATAMENTO									
		Provete seco após pré-tratamento	$m_b =$								
$K(G, T) = 0.01345$	$A = 100 G$	Perda no pré-tratamento	$N_p [\%] = 100 \cdot \frac{m_b}{m_a} (100 + \omega_A) =$								
	$m_b (G-1)$										
SEDIMENTAÇÃO											
Tempo [min]	Horas	Temper. [°C]	Correcção Temper. C_T	Leituras Densim. L_s	$L_c = \frac{L_s}{1 - C_M - C_A + C_T}$	$B = 10^3(L_c - 1)$ [cm]	$n_D = \frac{A \times B}{100}$ [%]	Z_s [cm]	$\frac{Z_s}{t}$	D [mm] = $K \sqrt{\frac{Z_s}{t}}$	N_D [%]
1	13:45	24.5	0.00090	1.0090	1.007	6.5	10.7	16.71894	16.71894	0.0550	10.4
2	13:46	24.5	0.00090	1.0085	1.006	6.0	9.9	16.82511	8.41256	0.0390	9.6
5	13:49	24.5	0.00090	1.0085	1.006	6.0	9.9	16.82511	3.36502	0.0247	9.6
15	13:59	24.0	0.00080	1.0085	1.006	5.9	9.7	16.82511	1.12167	0.0142	9.5
30	14:14	23.8	0.00076	1.0085	1.006	5.9	9.7	16.82511	0.56084	0.0101	9.4
60	14:44	23.2	0.00064	1.0085	1.006	5.7	9.5	16.82511	0.28042	0.0071	9.2
250	17:54	22.0	0.00040	1.0085	1.006	5.5	9.1	16.82511	0.06730	0.0035	8.8
1520	15:04	20.6	0.00012	1.0083	1.005	5.0	8.2	16.8782	0.01110	0.0014	8.0
2880	13:44	20.2	0.00004	1.0080	1.005	4.6	7.7	16.93128	0.00588	0.0010	7.5
Observações: Não foi realizado pré-tratamento, no entanto verificou-se que existe um pouco de matéria orgânica, embora desprezável.											
ENSAIOU :						CALCULOU E VERIFICOU :					
Elisa Silva e Soraia Almeida						Elisa Silva e Soraia Almeida					

		Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia		
ANALISE GRANULOMÉTRICA (E196 - 1966) do LNEC				
DATA	AMOSTRA 2_Solo Serra (FAlportel)			
08/05/2015				
MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g)			m _t = 1950.00	
MASSA RETIDA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)			m ₁₀ = 950.75	
MASSA PASSADA NO PENEIRO DE 2.00mm - # 10 (g)			m ₁₀ = 999.25	
FRAÇÃO RETIDA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
PENEIROS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA QUE PASSA
	m _x	N _x = (m _x / m _t) x 100	N _x	N _x = 100 - N _x
# 3 --> 76.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 2 --> 50.8 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 11/2 --> 38.1 mm	0.00	0.00	0.00	100.0
# 1 --> 25.4 mm	118.70	6.09	6.09	93.9
# 3/4 --> 19.0 mm	87.74	4.50	10.59	89.4
# 3/8 --> 9.51 mm	258.22	13.24	23.83	76.2
# 4 --> 4.76 mm	269.64	13.83	37.66	62.3
# 10 --> 2.00 mm	216.45	11.10	48.76	51.2
< 2.0 mm	999.25	51.24	---	---
TOTAL	1950.00	100.00	---	---
FRAÇÃO PASSADA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)				
			$\bar{N}_{10} = \bar{m}_{10} \times 100 = 51.24$	
MASSA AMOSTRA A ENSAIAR m _g = 48.20		m _t		
PENEIROS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA QUE PASSA
	m _x	N _x = (m _x / m _g) x 100	N _x	N _x = 100 - N _x
# 20 --> 0.850 mm	8.56	9.10	57.86	42.1
# 40 --> 0.425 mm	1.61	1.71	59.57	40.4
# 60 --> 0.250 mm	1.38	1.47	61.04	39.0
#140 --> 0.106 mm	4.14	4.40	65.44	34.6
#200 --> 0.075 mm	1.35	1.44	66.87	33.1
< 0.075 mm	31.16	33.13	100.00	---
TOTAL	48.20	51.24	---	---
Observação: A amostra passada no peneiro de 2,00mm foi aquecida durante 10 minutos e esteve no agitador de partículas durante 15 minutos.				
ENSAIOU :		CALCULOU :		VERIFICOU:
Elisa Silva e Soraia Almeida		Elisa Silva e Soraia Almeida		Elisa Silva e Soraia Almeida

 Instituto Superior de Engenharia Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Geotecnia															
DATA 08/05/2015		Amostra 2_Solo Serra (Alportel)													
Nº da Proveta	C	Provete seco ao ar $m_a = 55.00$ g													
Nº do Densímetro	98615	Teor em Água Higroscópica (NP-84)													
Antifloculante	Hexametáfosfato de sódio	Cápsul a nº	<table border="1"> <tr> <th>Peso cápsula</th> <th>Peso solo seco ao ar</th> <th>Peso solo seco</th> <th>Teor em Água</th> </tr> <tr> <td>P_{cap} [g]</td> <td>$m_{cap+solo ar}$ [g]</td> <td>$m_{cap+solo seco}$ [g]</td> <td>ω_A [%]</td> </tr> <tr> <td>133</td> <td>9.70</td> <td>19.52</td> <td>18.85</td> </tr> </table>	Peso cápsula	Peso solo seco ao ar	Peso solo seco	Teor em Água	P_{cap} [g]	$m_{cap+solo ar}$ [g]	$m_{cap+solo seco}$ [g]	ω_A [%]	133	9.70	19.52	18.85
Peso cápsula	Peso solo seco ao ar	Peso solo seco	Teor em Água												
P_{cap} [g]	$m_{cap+solo ar}$ [g]	$m_{cap+solo seco}$ [g]	ω_A [%]												
133	9.70	19.52	18.85												
Correcções	Menisc $C_M = 0.0005$	Provete seco $m_b = m_a \cdot \frac{100}{100 + \omega_A} = 51.25$ g													
	Antifloculante $C_f = 0.00348$														
Densidade das Partículas (NP-83)G	2.53	PRÉ-TRATAMENTO													
Temperatura média do ensaio T[°C]	21.2	Provete seco após pré-tratamento $m_r = 48.20$													
K (G, T) = 0.01402	A = 100 G 3.43 m_b (G-1)	Perda no pré-tratamento N_P [%] = $\frac{100 - m_b}{100} \cdot m_a = 5.95$													
SEDIMENTAÇÃO															
Tempo [min]	Horas	Temper. [°C]	Correcção Temper. C_T	Leituras Densím. L_S	$L_C = L_S + C_M - C_A + C_f$	$B = 10^3(L_C - 1)$ [cm]	$n_D = \frac{A \times B}{100}$ [%]	Z_S [cm]	$\frac{Z_S}{t}$	D [mm] = $K \sqrt{\frac{Z_S}{t}}$	N_D [%]				
1	15:47	21.4	0.00028	1.0130	1.010	10.3	35.3	15.87958	15.87958	0.0558	18.1				
2	15:48	21.4	0.00028	1.0130	1.010	10.3	35.3	15.87958	7.93979	0.0395	18.1				
5	15:51	21.4	0.00028	1.0120	1.009	9.3	31.9	16.09192	3.21838	0.0251	16.3				
15	16:01	21.2	0.00024	1.0115	1.009	8.8	30.1	16.19809	1.07987	0.0146	15.4				
30	16:16	21.2	0.00024	1.0105	1.008	7.8	26.6	16.41043	0.54701	0.0104	13.6				
60	16:46	21.2	0.00024	1.0095	1.007	6.8	23.2	16.62277	0.27705	0.0074	11.9				
250	19:56	21.2	0.00024	1.0080	1.005	5.3	18.0	16.94128	0.06777	0.0036	9.2				
1440	15:46	20.5	0.00010	1.0060	1.003	3.1	10.7	17.36596	0.01206	0.0015	5.5				
2880	15:46	21.0	0.00020	1.0055	1.003	2.7	9.3	17.47213	0.00607	0.0011	4.8				
Observações:		Foi realizado pré-tratamento ao solo, dado que continha mais de 2% de matéria orgânica. Juntou-se 150 cm ³ de água oxigenada a 20 volumes e deixou-se repousar durante a noite. No dia seguinte procedeu-se ao aquecimento e evaporação da mistura, tendo sido necessário juntar mais 50 cm ³ de água oxigenada. Quando o volume reduziu-se a 1/3 do inicial, colocou-se a mistura num tabuleiro e foi a secar à estufa a 100°C.													
ENSAIOU :				CALCULOU E VERIFICOU :											
Elisa Silva e Soraia Almeida				Elisa Silva e Soraia Almeida											