

Ana Patrícia Elias da Silva

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil



Estudo experimental sobre a influência da geometria das fendas no desenvolvimento da erosão interna

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Geotecnia

Orientadora: Doutora Laura Maria Mello Saraiva Caldeira,
Investigadora Coordenadora do LNEC

Coorientador: Professor Doutor João Paulo Bilé Serra,
Professor Associado Convidado da FCT/UNL, Investigador Principal do LNEC

Júri:

Presidente: Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

Arguente: Professora Doutora Teresa Teles Grilo Santana

Vogal: Doutora Laura Maria Mello Saraiva Caldeira,
Investigadora Coordenadora do LNEC



Setembro de 2019

Copyright © Ana Patrícia Elias da Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus familiares por todas as oportunidades que me proporcionaram, e por terem incentivado a minha formação académica. Como agradecer à instituição, nomeadamente ao corpo docente do Departamento de Civil da FCT, e em especial à Professora Teresa Santana.

Mas essencialmente, quero agradecer à Professora Laura Caldeira, pela sua orientação, compreensão, apoio e otimismo. Assim como, ao Professor Bilé Serra, coorientador, por todos os conhecimentos transmitidos, pela dedicação, disponibilidade, suporte e motivação.

Seguidamente, aos restantes elementos do LNEC que de alguma forma também contribuíram para a realização deste estudo, em particular à Amélia e ao Sr. Cardoso que me acolheram como uma filha. Á excelente profissional e amiga, Daniela, que foi incansável ao longo destes meses, que sentiu na pele todas as minhas derrotas, ensaio após ensaio, dias após dia. E que com uma grande dose de boa disposição me confortou diariamente.

E por último, mas não menos importante, um agradecimento especial ao meu amor, Bruno Fernandes por todo o companheirismo revelado ao longo deste percurso académico, essencial para a obtenção deste fim, assim como aos demais Mestres, com quem partilhei momentos únicos e que ficarão para sempre com grande apreço na minha memória.

Resumo

As barragens são essenciais para a nossa sociedade, por armazenarem um dos bens comuns mais valiosos e pelas demais regalias que promovem. No entanto, a insegurança estrutural das mesmas pode representar uma grande ameaça para as regiões circundantes.

Focando-nos apenas nos incidentes registados em barragens de aterro, as estatísticas indicam a erosão interna, como uma das principais causas. Sabe-se que a erosão interna pode estar associada à inevitável fendilhação inerente a este tipo de estruturas. Porém, o fenómeno só é despoletado quando determinado gradiente hidráulico potencia tensões de corte superiores às admitidas pelo material.

Para a estimativa da tensão de corte crítica do material, ao longo de uma fuga concentrada um dos ensaios laboratoriais mais recorrentes é o ensaio HET (*Hole Erosion Test*). O procedimento experimental deste ensaio consiste em submeter uma determinada amostra de solo compactada com um furo, a um determinado gradiente hidráulico. No entanto, a geometria circular atribuída à fissura é um aspeto alvo de crítica, uma vez que não é representativa da realidade.

Neste sentido, no presente estudo desenvolveu-se o ensaio CET (*Crack Erosion Test*), com o intuito de atribuir à fenda uma geometria retangular. Para o desenvolvimento do mesmo, foi necessário estabelecer uma nova metodologia de cálculo, assim como definir um procedimento para a execução da fenda.

Para a realização dos ensaios HET e CET recorreu-se a quatro solos, fisicamente contrastantes, nos quais também se fez variar a compactação e o teor em água. Por fim, compararam-se os resultados obtidos em ambos os ensaios, e mencionam-se alguns aspetos que devem continuar a ser alvo de estudo.

Palavras chave: barragens de terra; fendilhação; gradiente hidráulico; tensão de corte crítica; fuga concentrada; ensaio HET; Ensaio CET.

Abstract

Dams are essential for our society, for storing one of the most valuable commons and for the benefits they promote. However, their structural instability can become a major threat to the local regions.

Focusing only on incidents in embankment dams, statistics of failures indicate the internal erosion as one of the main causes. The internal erosion may be associated with cracking, inherent in this type of structures. However, the phenomenon is only initiated when the hydraulic gradient, intrudes in material shear stress than the soil can be admit.

To estimate the critical shear stress of the material, along a concentrated leak is one of the most recurrent laboratory tests is the *Hole Erosion Test* (HET). In this test, a soil sample is compacted, one a hole, and subject to a certain hydraulic gradient. However, the circular geometry attributed to the crack it is not representative of reality.

In this sense, in the present study, the *Crack Erosion Test* (CET) was developed in order to give to the crack a rectangular geometry. For its development, it was necessary to establish a new calculation methodology as well as to define a procedure for the execution of the crack.

For the HET and CET tests, four physically contrasting soils were used, as well as varying compaction and water content. Finally, the results obtained in both tests were compared, and some aspects that should continue to be studied as mentioned.

Key words: embankment dams; cracking; hydraulic gradient; shear stress critical; concentrated leak; HET; CET.

Índice de Conteúdo

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos e metodologia	2
1.3. Organização da dissertação.....	2
2. Erosão interna em barragens de aterro por fuga concentrada	3
2.1. Considerações gerais	3
2.2. Análise por árvore de eventos	5
2.2.1. Carregamento	6
2.2.2. Iniciação	6
2.2.3. Continuação.....	7
2.2.4. Progressão	7
2.2.5. Detecção, intervenção e reparação	7
2.2.6. Formação de brecha	8
3. Estudo da erosão interna através de fugas concentradas	11
3.1. Ensaio Pinhole.....	12
3.2. Ensaio de erosão de fissuras.....	13
3.3. Ensaio HET (<i>Hole Erosion Test</i>).....	15
3.4. Ensaios FLET e CFET.....	16
3.5. Ensaio CET	18
3.6. Ensaio de erosão de fissuras e o ensaio CET	18
4. Ensaios HET e CET	21
4.1. Descrição do equipamento.....	21
4.2. Preparação e compactação do provete.....	22
4.3. Montagem da célula de ensaio	25
4.4. Leituras	26
4.5. Critérios de paragem.....	26
4.6. Desmontagem da célula e medições.....	26
4.7. Metodologia de cálculo para o HET.....	27
4.8. Metodologia de cálculo para o CET	31
5. Estudo experimental.....	35
5.1. Considerações iniciais	35
5.2. Ensaios de identificação.....	35
5.2.1. Análise granulométrica	35
5.2.2. Limites de Consistência	36
5.2.3. Ensaio de determinação da densidade das partículas.....	37

5.3.	Ensaio de compactação.....	37
5.4.	Ensaio HET e CET.....	38
5.4.1.	Ensaio HET.....	38
5.4.2.	Ensaio CET.....	39
6.	Apresentação e discussão de resultados.....	43
6.1.	Ensaio de caracterização.....	43
6.2.	Ensaio de densidade de partículas.....	44
6.3.	Ensaio de compactação.....	45
6.4.	HET.....	46
6.4.1.	Solo B.....	46
6.4.2.	Solo C.....	48
6.4.3.	Solo D.....	52
6.4.4.	Solo A.....	57
6.5.	CET.....	58
6.5.1.	Solo A.....	58
6.5.2.	Solo C.....	66
6.5.3.	Solo B.....	77
6.5.4.	Solo D.....	79
6.6.	Discussão de resultados.....	80
7.	Conclusão.....	83
7.1.	Considerações finais.....	83
7.2.	Trabalhos futuros.....	84

Índice de Figuras

Figura 1 – Configurações genéricas de erosão interna (adaptado de Foster e Fell, 1999): (a) através do aterro; (b) através da fundação; (c) do aterros através da fundação.....	3
Figura 2 - Início da erosão interna: (a) por fuga concentrada, (adaptado de USBR, 2015); (b) regressiva (adaptado de Santos, 2014); (c) contacto (adaptado de USBR, 2015); (d) sufusão (adaptado de USBR, 2015).....	4
Figura 3 - Árvore de eventos: processo de erosão interna numa barragem de aterro (adaptado de Santos <i>et al.</i> , 2016).....	5
Figura 4 - Configurações associadas à formação de fendas (adaptado de ICOLD, 2016).....	7
Figura 5 - Alargamento excessivo da fuga concentrada (adaptado de ICOLD, 2016) de Fell <i>et al.</i> , 2007).....	8
Figura 6 – Ensaio de <i>Pinhole</i> , (adaptado de Caldeira, 2018).....	13
Figura 7 - Esquema ensaio de erosão de fissuras, (adaptado de Santos, R. 2014).....	14
Figura 8 – Esquema de ensaio HET (adaptado de Santos <i>et al.</i> , 2010).....	15
Figura 9 - Célula de ensaio - FLET, adaptado de Santos <i>et al.</i> (2014).....	17
Figura 10 - Célula de ensaio - CFET, adaptado de Santos <i>et al.</i> (2014).....	17
Figura 11 - Esquema de ensaio FLET, adaptado de Santos, R. (2014).....	18
Figura 12 - Equipamento HET desenvolvido no LNEC.....	22
Figura 13 - Célula de ensaio intercalada no sistema hidráulico, tubos piezométricos instalados a montante e a jusante e correspondente sistema de leitura.....	22
Figura 14 - Utensílios para a compactação da amostra e discos de geomembrana com geotêxtil.....	23
Figura 15 – Geomenbranas com geotêxtil: (a) utilizadas nos ensaios HET; (b) utilizadas nos ensaios CET.....	23
Figura 16 - Processo de diminuição da altura do corpo de prova: (a) deslocação do material em excesso, até os dois discos entrarem no interior do molde;(b) disco no interior do molde.....	24
Figura 17 - Sistema de perfuração do provete para o ensaio HET.....	24
Figura 18 – Sistema de cravação e extração da lâmina para o ensaio CET: (a) sistema fixo ao extrator de amostras; (b) provete perfurado.....	25
Figura 19 - Chapa metálica: (a) utilizada nos ensaios HET; (b) utilizada nos ensaios CET.....	26
Figura 20 - Volume de controlo para um escoamento sob pressão entre duas secções de um tubo inclinado (adaptado de Santos <i>et al.</i> , 2014 a partir de White, 1998).....	28
Figura 21 – Exemplo da estimativa da evolução do diâmetro do tubo.....	31
Figura 22 – Exemplo da estimativa da taxa de erosão e da tensão de corte crítica τ_c	31
Figura 23 - Peneiração da amostra B no peneiro nº4 (malha de dimensão 4,75mm).....	36
Figura 24 - Etapas do ensaio de sedimentação: (a) suspensão das partículas; (b) peneiração do material retido no peneiro nº200, que abrange partículas de dimensões entre 75 e 2000 μm	36
Figura 25 – Limites de consistência: (a) limite de liquidez, com a utilização da concha de Casagrande; (b) limite de plasticidade.....	37
Figura 26 – Exemplo dos picnómetros preenchidos com 25 g do solo D e água destilada.....	37
Figura 27 - Ensaio de compactação do solo C: (a) processo de aplicação de energia à primeira camada; (b) rasamento do molde para cálculo do peso volúmico.....	38
Figura 28 – Instrumentos para a perfuração do provete: (a) espátula; (b) guia e faca.....	40
Figura 29 - Perfuração do provete: (a) engenho de perfuração; (b) guia; (c) provete perfurado.....	40
Figura 30 - Sistema de cravação e de extração da lâmina: (a) sistema fixo ao extrator de amostras; (b) suporte do molde, chapa circular que fixa o suporte às hastes do extrator e lâmina com nível.....	41
Figura 31 - Curvas granulométricas dos solos A, B, C e D.....	43
Figura 32 - Curvas de compactação dos solos ensaiados.....	45
Figura 33 - Evolução do caudal em função do tempo no ensaio HET do solo B.....	46
Figura 34 - Ensaio HET do solo B: (a) acumulação do material erodido e turbidez da água no reservatório de jusante; (b) acumulação do material erodido na câmara de jusante; (c) erosão na zona superior do provete por colapso do furo, pormenor do disco de geotêxtil.....	47

Figura 35 - Resultado de um ensaio do solo B: (a) erosão do provete no lado jusante; (b) molde de parafina, que permite observar a tendência do solo erodir de forma regressiva.....	48
Figura 36 - Moldes de parafina referentes aos provetes 1, 2 e 3 do solo C, com a extremidade de montante para cima.	49
Figura 37 – Ensaio HET do solo C. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice de tensão de corte crítica, τ_c	50
Figura 38 - Ensaio HET do solo C. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c , do solo C: (a) provete 2; (b) provete 3.	51
Figura 39 – Ensaio HET. Comportamento inesperado pela amostra D, do provete com comportamento atípico.....	52
Figura 40 - Moldes de parafina referentes aos provetes do solo D, dispostos por ordem crescente de teor em água (32, 34 e 36%) da esquerda para direita e com a extremidade de montante para cima.	53
Figura 41 - Ensaio HET do solo D. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c : (a) provete 1; (b) provete 2.	54
Figura 42 - Ensaio HET do solo D. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c , do provete 3.	55
Figura 43 – Ensaio HET do solo D. Evolução do caudal e das alturas piezométricas em função do tempo: (a) provete 1; (b) provete 2; (c) provete 3.	56
Figura 44 - Ensaio HET. Estimativa do diâmetro do furo, do índice da taxa de erosão, I_{HET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do solo A.	58
Figura 45 - Execução da fenda com a espátula no provete 1 do solo C: (a) penetração da espátula; (b) provete 1 do solo A após perfuração.....	59
Figura 46 – Evolução do caudal no ensaio CET do solo A: (a) ao longo de todo o ensaio; (b) nos primeiros 50 minutos de ensaio.....	60
Figura 47 - Evolução das alturas piezométricas no ensaio CET do solo A: (a) ao longo de todo o ensaio; (b) nos primeiros 50 minutos de ensaio.	61
Figura 48 - Moldes de parafina dos provetes do solo A após ensaio CET.....	62
Figura 49 - Ensaio CET do solo A. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c : (a) provete 1; (b) provete 2.....	64
Figura 50 – Ensaio CET do solo A. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c : (c) provete 3; (d) provete 4.....	65
Figura 51 - Ensaio CET do solo A. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 5.	66
Figura 52 - provete 1 do solo C após a perfuração.	67
Figura 53 - Evolução do caudal em função do tempo nos ensaios dos provetes 1 e 2 do solo C.	68
Figura 54 - Alturas piezométricas registadas nos ensaios realizados aos provetes 1 e 2 do solo C.....	68
Figura 55 - Moldes de parafina, dos provetes 1 e 2 do solo C ensaio CET.....	68
Figura 56 – Ensaio CET solo C. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 1.	69
Figura 57 - Ensaio CET solo C. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 2.	70
Figura 58 – Evolução do caudal no ensaio CET do solo C: (a) provete 3; (b) provete 4; (c) provete 5.	71
Figura 59 - Interior dos provetes 3, 4 e 5 após a realização do ensaio CET (dispostos pela respetiva ordem a partir da esquerda).....	71
Figura 60 - Evolução do caudal no ensaio CET do solo C: provete 6.	72
Figura 61 - Molde de parafina e superfícies irregulares do provete 6 do solo C após ensaio CET.	73
Figura 62 – Fenda do provete 7 do solo C: (a) face de jusante; (b) face de montante.	73
Figura 63 - Evolução do caudal e das alturas piezométricas no ensaio CET do provete 7 do solo C.....	73
Figura 64 - Molde de parafina e superfícies interiores no ensaio CET do provete 7 do solo C: (a) superfícies irregulares; (b) extremo de jusante que sofreu maior erosão.	74
Figura 65 - Evolução do caudal ao longo do tempo no ensaio CET nos ensaios dos provetes 10 e 11 do solo C.	75

Figura 66 - Moldes de parafina e o interior dos provetes do solo C: (a) provete 10; (b) provete 11.	75
Figura 67 – Ensaio CET do solo C. Estimativa da espessura da fenda, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c , do provete 10.	76
Figura 68 - Ensaio CET do solo C. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, $ICET$, e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 11.	77
Figura 69 – Solo B compactado e perfurado, com desprendimento de material na extremidade de montante.....	78
Figura 70 – Molde de parafina do provete da amostra B, disposto com a extremidade de jusante para cima.	78
Figura 71 - Provetes do material D após o ensaio CET.	79

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Classificação dos solos de acordo com ASTM (D4647-93).....	13
Tabela 3.2 – Classificação dos solos em função da sua suscetibilidade à erosão (adaptado de ICOLD, 2016, e Wan 2006).....	16
Tabela 5.1 – Número de ensaios realizados.	38
Tabela 6.1 - Limites de consistência das amostras A, B, C e D.	43
Tabela 6.2 - Classificação das amostras.....	44
Tabela 6.3 - Densidade das partículas sólidas das amostras.....	44
Tabela 6.4 - Teor em água ótimo e peso volúmico máximo seco associado a cada amostra.	45
Tabela 6.5 - Ensaio HET condições iniciais C.	48
Tabela 6.6 - Ensaio HET condições finais e parâmetros de erodibilidade amostra C.	50
Tabela 6.7 - Ensaio HET condições iniciais dos provetes do solo D.....	53
Tabela 6.8 - Ensaio HET condições finais e parâmetros de erodibilidade ao solo D.	57
Tabela 6.9 - Ensaio HET condições iniciais do provete 1 do solo A.....	57
Tabela 6.10 - Ensaio HET condições finais e parâmetros de erodibilidade ao solo A.....	58
Tabela 6.11 – Ensaio CET condições iniciais dos provetes solo A.	59
Tabela 6.12 – Ensaio CET condições finais e parâmetros de erodibilidade do solo A.....	63
Tabela 6.13 - Ensaio CET condições iniciais para os provetes 1 e 2 do solo B.	67
Tabela 6.14 – Ensaio CET condições finais e parâmetros de erodibilidade do solo C.....	69
Tabela 6.15 - Ensaio CET condições iniciais dos provetes 10 e 11 do solo C.	74
Tabela 6.16 - Ensaio CET condições finais e parâmetros de erodibilidade dos provetes 10 e 11 do solo C.	76
Tabela 6.17 – Ensaios HET dos solos analisados. Preparados com o teor em água ótimo e compactação .	80
Tabela 6.18 - Ensaio CET do solo C. Parâmetros de erodibilidade estimados, influência do método de cravação.	81

Nomenclatura

Abreviatura	Descrição	Unidades
A_t	Área transversal associada a num instante de tempo	m^2
C_c	Coeficiente de curvatura	-
C_e	Coeficiente da erosão do solo	-
C_l	Coeficiente de limitação de fluxo	-
C_e	Coeficiente de uniformidade	-
D	Diâmetro	m
D_{Lt}	Diâmetro em regime laminar num instante de tempo	m
e	Largura da fenda	m
D_{Tt}	Diâmetro em regime turbulento num instante de tempo	m
f_{Lt}	Fator associado ao regime laminar num instante de tempo	$kN \cdot s/m^3$
f_{Tt}	Fator associado ao regime turbulento num instante de tempo	$kN \cdot s/m^4$
g	Aceleração gravítica	m/s^2
G	Densidade das partículas sólidas	-
H_f	Perda de carga	m
i	Gradiente hidráulico	-
i_{crit}	Gradiente hidráulico crítico	-
I_{HET}	Taxa de erosão no ensaio HET expressa em função logarítmica	-
I_{CET}	Taxa de erosão no ensaio CET expressa em função logarítmica	-
$I_{CET}(i)$	Taxa de limitação do fluxo no ensaio CET em função logarítmica	-
k_1	Coeficiente de condutibilidade da fenda	-
k_{er}	Coeficiente de erosão	-
IP	Índice de plasticidade	%
L	Largura da fenda	m
LL	Limite de liquidez	%
LP	Limite de plasticidade	%
$P_{w,t}$	Perímetro molhado	m
t	Instante de tempo	s
\bar{u}_t	Velocidade do fluido num determinado instante de tempo.	m/s
w_{opt}	Teor em água ótimo	%
$\gamma_{d max}$	Massa volúmica seca máxima	kN/m^3
γ_d	Massa volúmica seca	kN/m^3
Δ	Variação	-
ε	Taxa de erosão	-
μ	Viscosidade cinemática	Pa/s
π	Pi	-
ρ_d	Massa volúmica do solo	kN/m^3
ρ_w	Massa volúmica da água	kN/m^3
τ	Tensão de corte	N/m^2
τ_c	Tensão de corte crítica	N/m^2
τ_{max}	Tensão de corte máxima	N/m^2
ψ_t	Área da superfície interior da fenda	m^2

R_e Número de Reynolds

-

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Ao longo das últimas décadas, a escassez de água causada pelas alterações climáticas que se fazem sentir a nível mundial e ao caráter ecológico da energia hidráulica, capaz de produzir energia renovável, cresceu a necessidade de um maior aproveitamento de infraestruturas de armazenamento de água. Segundo dados da ICOLD (*International Commission on Large Dams*), existem mais de 59 000 barragens em todo o mundo. Dentro dos vários usos associados a estas infraestruturas, os mais representativos são a irrigação, a produção de energia e o controlo de cheias[W1].

Contudo, apesar das inúmeras vantagens que advém deste tipo de infraestrutura, existe um grande perigo inerente às zonas a jusante.

Dado o historial de acidentes ocorridos ao longo do tempo, o Comité de Barragens de Aterro da ICOLD, decidiu, em 2009, elaborar orientações sobre a erosão interna, uma vez que é a causa principal de muitas roturas e incidentes em barragens de aterro. A maioria dos incidentes ocorre durante ou logo após o primeiro enchimento, e cerca de um terço das roturas, nas barragens existentes, ocorrem por erosão interna. Um desses casos trágicos, como o incidente da barragem de Situ Gintung, em 1930, resultou na morte de 100 pessoas (ICOLD, 2016).

A erosão interna é um fenómeno extremamente complexo, uma vez que se pode manifestar e desencadear de formas distintas. No entanto, sabe-se que é consequência da suscetibilidade dos constituintes e dos carregamentos impostos à estrutura (ICOLD, 2016).

Atualmente, o combate à erosão interna pode passar, além da implementação de filtros eficientes, pelo uso de certos materiais dispostos a montante do núcleo, que podem ser essenciais no controlo do fenómeno. Apesar de ser algo ainda pouco aprofundado, alguns autores procuram caracterizar quais os materiais e em que condições podem contribuir para uma melhoria, de modo a evitar a formação de um mecanismo de rotura. Porém, todas as investigações realizadas, maioritariamente, advem de ensaios laboratoriais que podem não ser representativos.

Os ensaios existentes para caracterizar a resistência à erosão dos materiais ao longo de uma fenda e a capacidade de outros restringirem o fluxo, consistem em submeter uma amostra compactada e fissurada a um determinado gradiente hidráulico. Para além da amostra ser compactada na vertical e ser ensaiada na horizontal (no sentido do fluxo), a fissura é simulada através de um furo circular, cuja representatividade pode não ser próxima da realidade. A geometria atribuída à “fenda” neste tipo de ensaios é um dos aspetos mencionados na literatura que deve ser alvo de estudo (Caldeira, 2018).

1.2. Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como principal objetivo investigar um dos aspetos alvo de crítica na literatura, num dos ensaios mais recorrentes, no estudo da erodibilidade dos solos, o ensaio de erosão ao longo de um furo - HET (*Hole Erosion Test*).

Pretende ensaiar-se solos finos na forma convencional, realizando ensaios HET, nos quais a fissura é simulada de forma circular, e posteriormente comparar os resultados obtidos com os novos ensaios, nos quais a fissura é reproduzida por uma fina seção retangular. Estes novos ensaios, designados CET (*Crack Erosion Test*), serão também desenvolvidos ao longo do trabalho, uma vez que a nova geometria implicará alterações a nível prático e da interpretação dos ensaios.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação é composta por cinco capítulos, dos quais este primeiro é destinado ao enquadramento do tema e à organização de todo o trabalho desenvolvido. O capítulo 2, intitulado Erosão interna em barragens zonadas por fugas concentradas, com base na literatura existente, contém, resumidamente, toda a informação analisada para prosseguir o objetivo da tese. Fornece informação sobre a erosão interna em barragens de aterro e, mais especificamente, quando a erosão interna se inicia devido a fugas concentradas, que advém da fendilhação devido a assentamentos diferenciais ou de outro tipo de fenómenos que possam comprometer a integridade dos mesmos. O capítulo 3, intitulado Estudo da fuga concentrada, refere alguns dos ensaios laboratoriais que mais têm contribuído na investigação deste fenómeno. Porém, o foco é direcionado para o HET, dado o objetivo primordial da presente dissertação. Como tal, contempla uma breve descrição do equipamento utilizado, desenvolvido no LNEC, assim como todos os procedimentos exigidos pelo ensaio e a metodologia de cálculo. O capítulo 4, sobre os Ensaios HET e CET, descreve os procedimentos necessários para a realização dos ensaios HET e CET, assim como o tratamento dos dados obtidos. O Capítulo 5, com o Estudo Experimental, descreve os ensaios de caracterização das amostras alvo de estudo, e apresenta uma primeira abordagem aos ensaios HET e CET realizados. O Capítulo 6, intitulado Apresentação e discussão de resultados, fornece a caracterização das amostras alvo de estudo, nomeadamente a análise granulométrica, limites de consistência, densidade das partículas, curva de compactação e os parâmetros de erodibilidade obtidos através dos ensaios. Os resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade encontram-se subdivididos, em HET e CET. Por último, o capítulo 7, inclui as considerações finais e os desenvolvimentos futuros, onde se pondera a realização de novos ensaios para precisar as diferenças obtidas, assim como aperfeiçoar a metodologia dos mesmos com a finalidade de obter comparações com restantes ensaios que envolvem furos.

Seguem-se as referências bibliográficas mencionadas e utilizadas ao longo do trabalho.

2. Erosão interna em barragens de aterro por fuga concentrada

2.1. Considerações gerais

Baseado nos registos da ICOLD (2016), as estatísticas de roturas e incidentes em barragens de aterro consideram a erosão a causa de 94% dos incidentes em barragens de aterro, dos quais 46% correspondem a erosão interna. Como tal, nas últimas décadas, muitos autores procuraram compreender este fenómeno e melhorar a capacidade resistente deste tipo de estruturas.

Von Thun (1996) menciona que o processo de erosão interna necessita de uma fonte, de um canal induzido num material erodível e por fim de uma saída livre.

Porém, a literatura também salienta outros aspetos de extrema importância para o desenvolvimento do fenómeno, como o processo construtivo, referenciando a compactação e o teor de água, as irregularidades nas fundações, a geometria da estrutura, ou a presença de elementos rígidos, como condutas.

Este fenómeno ocorre, mais precisamente, quando as forças hidráulicas exercidas sobre a estrutura, nomeadamente no corpo ou na fundação da barragem, são suficientes para promover o desprendimento das partículas e o seu arraste para outras zonas. É possível constatar que, geralmente, este fenómeno se desenvolve em zonas concentradas. Em função da sua localização é, assim, possível fazer as seguintes distinções, de um modo sucinto:

- erosão interna através do aterro (Figura 1a);
- erosão interna através da fundação (Figura 1b);
- erosão interna do aterro através da fundação (Figura 1c);
- erosão ao longo de estruturas externas ou em zonas de interface entre materiais.

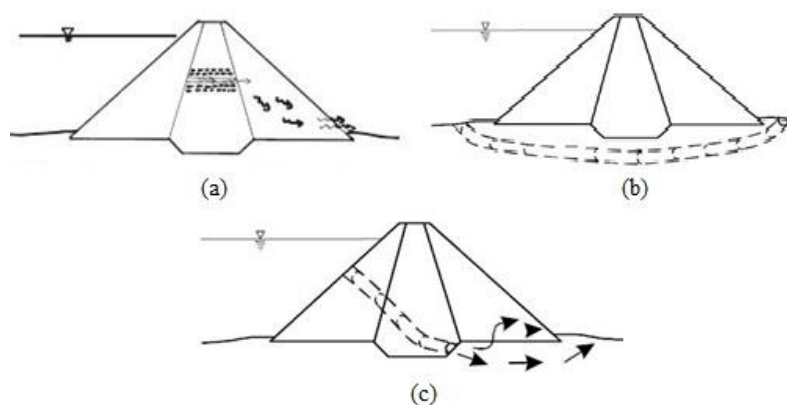


Figura 1 – Configurações genéricas de erosão interna (adaptado de Foster e Fell, 1999): (a) através do aterro; (b) através da fundação; (c) do aterros através da fundação.

Para além disso, ainda é possível diagnosticar como este processo pode ser desencadeado numa fase inicial, cujos carregamentos impostos e a suscetibilidade dos materiais podem gerar os seguintes cenários (ICOLD, 2016):

- Erosão por fuga concentrada (Figura 2a) - desenvolve-se em pequenas fissuras, e estão maioritariamente associadas a assentamentos diferenciais ou a fenómenos como ciclos de gelo e degelo, e de molhagem e secagem;
- Erosão regressiva (Figura 2b) - este mecanismo está associado ao arrastamento do solo ao longo das trajetórias pelas quais ocorre percolação. Existem dois tipos de erosão regressiva, que podem ser designados por: erosão tubular, quando o solo permite a formação de um canal, e tem capacidade para sustê-lo, ou global, em situações em que o canal colapsa com a evolução da erosão e, conseqüentemente, provoca o rearranjo do material adjacente;
- Erosão por contacto (Figura 2c) - advém do contraste granulométrico entre solos adjacentes. Quando a velocidade da água que percola o material mais grosseiro é suficientemente grande para iniciar a erosão do solo mais fino. Trata-se de um mecanismo, por vezes, associado à interface entre o aterro e a fundação;
- Sufusão (Figura 2d) - ocorre quando as partículas de maiores dimensões formam uma estrutura sem finos (um esqueleto de solo) devido ao arraste das partículas de menores dimensões, comum em materiais de granulometria descontínua. Pode induzir assentamentos superficiais.

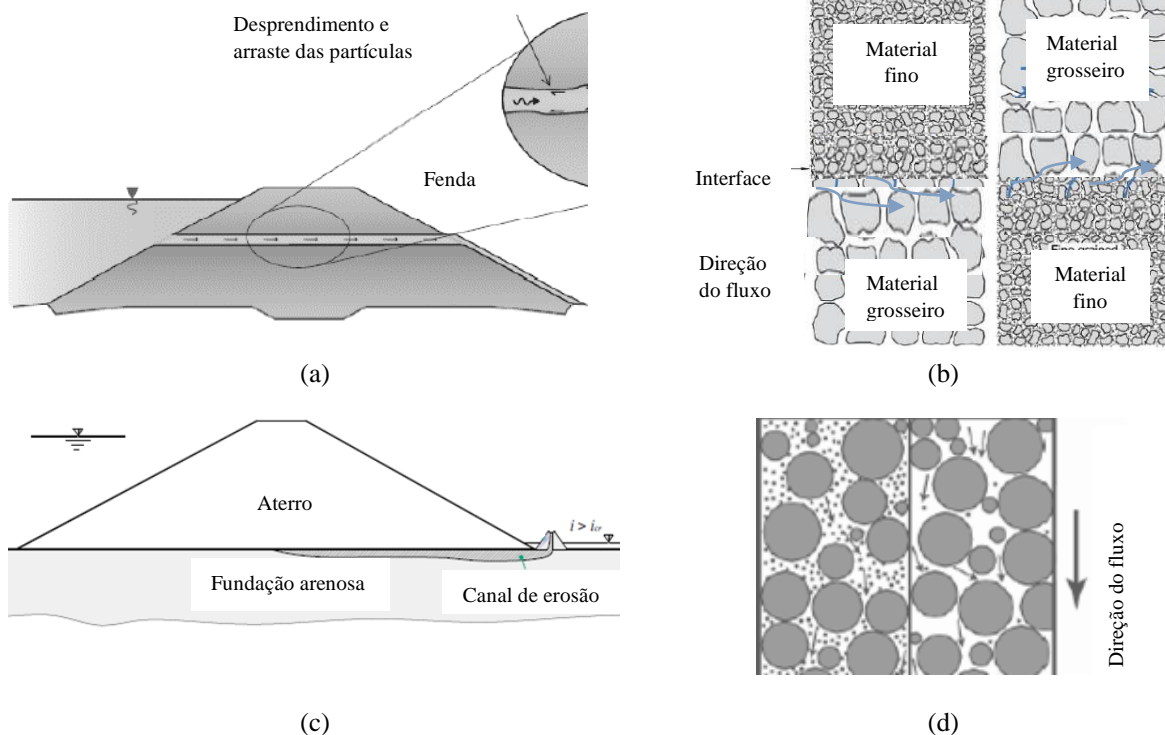


Figura 2 - Início da erosão interna: (a) por fuga concentrada, (adaptado de USBR, 2015); (b) regressiva (adaptado de Santos, 2014); (c) contacto (adaptado de USBR, 2015); (d) sufusão (adaptado de USBR, 2015).

O início da erosão interna por fuga concentrada ocorre no interior de eventuais fissuras. Importa, então, compreender quais as ações que provocam estes danos, assim como o modo de desencadeamento de todo este processo e eventuais formas de intervir.

2.2. Análise por árvore de eventos

A procura do conhecimento sobre esta temática, levou desde cedo, a uma abordagem probabilística, baseada nos dados existentes.

Estatisticamente, os estudos realizados nas últimas décadas revelam que grande parte dos incidentes ocorrem durante o primeiro enchimento ou os primeiros anos de exploração e, efetivamente, durante esse período a estrutura experimenta o progressivo enchimento da albufeira, podendo o nível da água subir além de eventuais fendas transversais geradas pelos assentamentos construtivos.

Para melhor apreciação do cenário de erosão interna, em geral, este é decomposto em várias fases, sendo a probabilidade de rotura associada a barragens de aterro avaliada através de árvores de eventos. A árvore de eventos (Figura 3) mostra a potencial sequência de ocorrência devido a erosão interna quando a barragem é submetida a um determinado carregamento hidráulico.

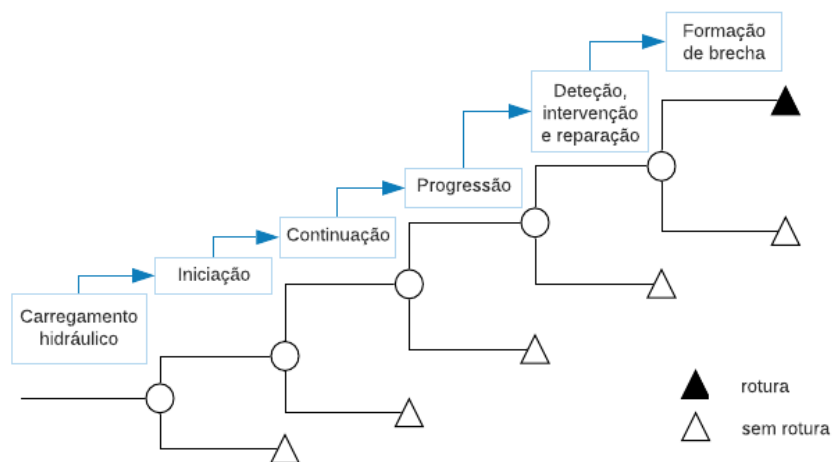


Figura 3 - Árvore de eventos: processo de erosão interna numa barragem de aterro (adaptado de Santos *et al.*, 2016).

Quando a erosão interna é consequência de uma fuga concentrada no núcleo de uma barragem de terra zonada, a iniciação ocorre quando determinado carregamento gera forças excessivas no interior da fenda e consequentemente ocorre arraste de partículas. Diante desta situação, a erosão interna pode, ou não, continuar dependendo do comportamento dos materiais que constituem o filtro, sendo que, quando o filtro não é adequado, a erosão progride.

Na fase de progressão, os materiais provenientes de montante podem contribuir para o preenchimento da fissura e por fim preencher a fenda. No entanto, quando tal não acontece e não ocorre uma intervenção atempada, a barragem pode formar-se uma brecha na barragem e esta romper (Santos *et al.*, 2016).

Apresentam-se, seguidamente, os aspetos mais relevantes correspondentes a cada uma das fases indicadas na Figura 3.

2.2.1. Carregamento

O carregamento ao qual uma barragem de aterro pode estar sujeita advém de uma combinação de vários tipos de carga.

A USBR (*United States Reclamation Service*, 2015) refere que as barragens podem sofrer danos estruturais como consequência de carregamentos excessivos e que genericamente estes podem ser classificados em: estáticos, hidráulicos e sísmicos. Porém, é suscetível que possam ocorrer outro tipo de carregamentos, como ambientais (árvores, raízes), causados por animais ou, até mesmo, devido à intervenção humana (explosões, vandalismo).

Note-se que, para estes carregamentos, a resposta estrutural ao carregamento pode não ser a mesma ao longo do tempo. Em conformidade com a ICOLD (2016), a deterioração da estrutura torna-a mais vulnerável à erosão interna. Porém, salienta que deterioração não é sinónimo de envelhecimento da barragem.

No entanto, importa perceber que, para a erosão interna por fuga concentrada se iniciar, apenas interessa o carregamento estrutural que induz a fissura ou a fenda no núcleo, e na iniciação, na continuação, na progressão e na formação da brecha, o carregamento hidráulico, ou seja, o gradiente hidráulico ao qual está sujeita (ICOLD, 2016).

2.2.2. Iniciação

A iniciação da erosão interna em barragens zonadas por meio de fugas concentradas, como já mencionado anteriormente, está relacionada com a existência de fendas.

A ICOLD (2016) refere que as fendas, maioritariamente, remetem para as seguintes situações (Figura 4):

- assentamentos diferenciais associados ao processo de construtivo e ao processo consolidação do núcleo;
- zonas de contacto do aterro com estruturas rígidas, como descarregadores, paredes embutidas ou o contacto entre troços de betão e de aterro de barragens mistas;
- presença condutas, que dificultam o processo de compactação na envolvente;
- arqueamento do núcleo a partir dos encontros, devido à forma do vale;
- assentamento da fundação, devido às cargas impostas e à sua constituição;
- pequenas irregularidades na interface entre a fundação e o núcleo;
- zonas deficientemente compactadas;
- dessecação;

- liquefação sísmica;
- ação do gelo e do degelo;
- presença de animais, que podem construir tocas;
- vegetação, mais precisamente as raízes, que podem ter efeitos nefastos.

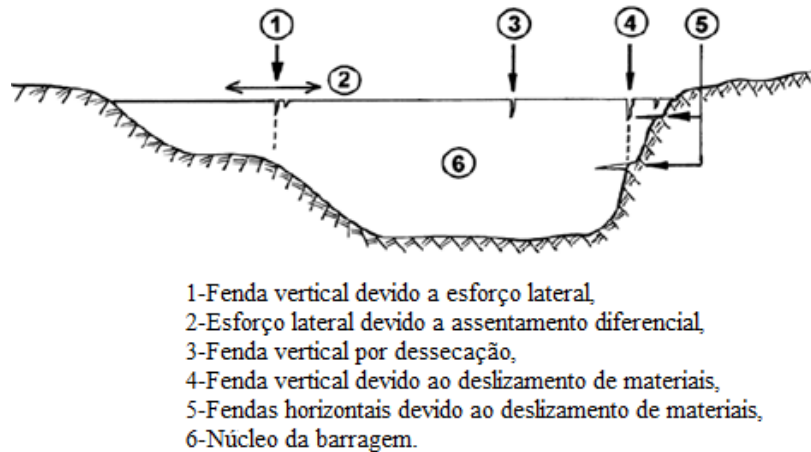


Figura 4 - Configurações associadas à formação de fendas (adaptado de ICOLD, 2016).

2.2.3. Continuação

A continuação consiste na segunda fase deste processo de erosão interna. Muitos autores assumem que este fenómeno pode ser interrompido na fase inicial, ou seja, não continuar, se existir um sistema de filtros eficiente, que satisfaça os critérios de dimensionamento modernos. Como tal, esta fase está estritamente dependente das características dos filtros que a barragem possui (ICOLD, 2016).

2.2.4. Progressão

Designa-se por progressão, o momento em que se evidencia a ampliação da fenda ao longo da qual o material é erodido. A ICOLD (2016) menciona que para tal devem estar reunidas duas condições, ou seja, a condição mecânica, que permite a expansão da fenda e a capacidade de a manter aberta, sem colapsar (capacidade de suportar o teto), e a condição hidráulica, que permite o prosseguimento do arrastamento das partículas.

2.2.5. Detecção, intervenção e reparação

Em barragens de aterro é necessário estabelecer o tipo observação necessário, como a frequência de monitorização e de inspeção visual, de forma a compreender eventuais sinais de erosão interna e a permitir detetar as suas evidências (USB, 2015). Contudo, a deteção é mais provável quando a erosão toma grandes dimensões e já se encontra no limiar da fase de progressão (Santos *et al.*, 2016).

A monitorização deve ser projetada de forma a identificar eventuais variações de gradientes hidráulicos e de velocidades de escoamento, assim como, deve estar localizada em zonas mais vulneráveis ao fenómeno. Salienta-se o facto dos equipamentos não serem capazes de detetar a erosão interna, mas poderem

diagnosticar alterações relevantes no escoamento através do aterro. Paralelamente, para um desempenho satisfatório da barragem e da fundação, estes devem permitir uma monitorização a longo prazo (ICOLD, 2016).

A intervenção implica medidas de controlo adequadas, promovidas por pessoal técnico e equipamentos/materiais adequados. Para tal, é importante perceber se a área afetada é acessível e se é possível diminuir o nível da albufeira, dado que este processo de limitação da progressão pode passar pela diminuição dos gradientes hidráulicos, e consequentemente, da altura de água na albufeira. Para além desta solução, existem mais alternativas, como por exemplo a colocação/reposição de material a montante (ICOLD, 2016).

A probabilidade de sucesso advém, não só, de uma intervenção atempada, como também das propriedades dos materiais constituintes da barragem, porque se a erosão não for travada, ou seja, se continuar, o tempo até se desenvolver um mecanismo de rotura pode ser muito curto (ICOLD, 2016).

2.2.6. Formação de brecha

Quando as fases de deteção e de intervenção não são satisfatórias, a erosão interna pode atingir um limiar, desenvolvendo-se uma brecha de rotura na barragem, através da qual se processa o escoamento não controlado da água, com erosão superficial progressiva dos materiais.

Nesta última fase, pode ocorrer, com uma menor probabilidade, a estabilização do processo ou a ampliação excessiva da fuga concentrada, que consequentemente pode proporcionar o colapso estrutural e a libertação descontrolada da água da albufeira (ICOLD, 2016).

Entre os demais mecanismos de formação de brecha, como o galgamento ou a instabilidade do talude a jusante, a ampliação excessiva de uma fuga concentrada representa o maior número de incidentes.

Este mecanismo está associado a cotas de albufeira elevadas e a barragens homogéneas ou zonadas compostas por solos capazes de suportar as fendas. Pode levar ao colapso ou abatimento do coroamento da barragem (Figura 5).

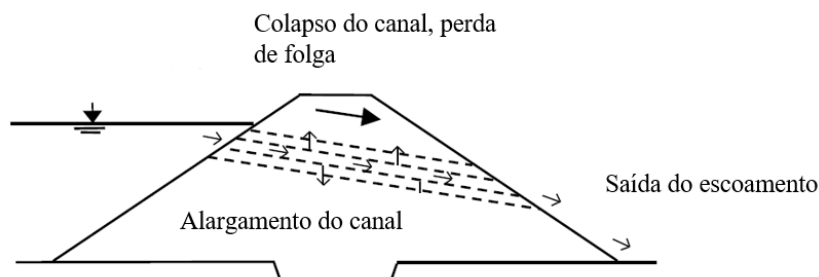


Figura 5 - Alargamento excessivo da fuga concentrada (adaptado de ICOLD, 2016) de Fell *et al.*, 2007).

No sentido de evitar a formação de uma brecha por alargamento excessivo da fuga concentrada, nas últimas décadas muitos autores procuraram compreender este fenómeno. Em suma, perceberem realmente como se

Estudo experimental com o ensaio HET da influência da geometria das fendas no desenvolvimento de erosão interna

desenvolve e quais os fatores que mais contribuem para o seu desenvolvimento. No capítulo seguinte, são mencionados os aspectos que devem ser analisados, assim como os ensaios mais frequentes.

3. Estudo da erosão interna através de fugas concentradas

O estudo da erosão interna através de fugas concentradas, que podem ser tubos ou fendas, procura estimar a tensão de corte instalada ao longo do tubo ou da fenda, para que seja possível compará-la com a tensão de corte crítica, a qual se define como a tensão mínima necessária para o desprendimento de partículas das paredes do tubo ou da fenda.

Como tal, à priori é necessário analisar a localização do tubo ou da fenda e determinar a sua geometria. Para além disso, é necessário ter em consideração a percolação através da barragem de aterro, designadamente a geometria do núcleo do aterro, e as características dos materiais constituintes do aterro, designadamente, a dispersividade dos solos nos locais onde o tubo ou a fenda pode ocorrer.

A ICOLD (2016) menciona que a geometria do furo ou da fenda, nomeadamente o diâmetro do furo ou a abertura e a largura da fenda, consoante seja um furo circular ou uma fenda vertical, podem ser estimados através de métodos como o de Fell *et al.* (2008) e Fell *et al.* (2007) (métodos baseados em trabalhos de Sherard (1973), Talbot (1994), Lawrence (2002) e Bui *et al.* (2004, 2005)) e que a tensão de corte que atua nas paredes do furo ou da fenda pode ser estimada pelas expressões (3.1) e (3.2) de Wan (2006), Wan e Fell (2002, 2004, a, b):

$$\tau = \frac{\rho_w g H_f d}{4L} \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{\rho_w g H_f^2 e}{2(H_f + W)L} \quad (3.2)$$

onde, as variáveis têm o significado seguinte:

τ = tensão de corte (N/m^2);

ρ_w = massa volúmica da água (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

H_f = perda de carga ao longo do furo/fenda (m);

d = diâmetro do furo (m);

L = comprimento do furo/fenda (m);

e = largura da fenda (m).

Quanto à análise da dispersividade, importa conhecer as propriedades dos materiais. Os solos com elevada percentagem de montmorilonite sódica ou cálcica tendem a ser dispersivos, enquanto que solos com maior

teor de caulinite tendem a ser não dispersivos. Porém, salienta-se o facto de que a composição química da água também deve ser analisada, pois pode influenciar a dispersividade do material.

Os ensaios com foco na análise de dispersão mais comuns são o *Emerson Aggregate Test*, o ensaio do *Soil Conservation Service (SCS)*, o ensaio de *Pinhole* e os ensaios químicos.

Muito sucintamente, o *Emerson Aggregate Test*, publicado pela USBR (1979), e o ensaio *Pinhole*, estabelecido na norma ASTM (D4647-93), permitem classificar os solos quanto à sua dispersividade. O primeiro categoriza a dispersividade em oito classes, sendo que a classe número um corresponde a alta dispersividade e a classe número oito a baixa dispersividade. O segundo classifica os solos como D1 e D2, quando dispersivos, e ND1 e ND2, quando não dispersivos (ICOLD, 2016).

Estas classificações devem ser complementadas com a realização de ensaios químicos de água proveniente da albufeira da barragem, para determinação do teor de sódio, uma vez que maiores percentagens de sal contribuem para uma menor dispersão. Aliás, a ICOLD (2016) sugere que os ensaios, para além de serem executados com água destilada, também devem ser efetuados com água proveniente da albufeira devido às suas propriedades intrínsecas, nomeadamente, o teor de sal.

Os ensaios laboratoriais para estudar a erodibilidade dos solos compreendem ensaios de rotação cilíndrica, descritos por autores como Arulanandan e Perry (1983), Chapius e Gatien (1986), Lim (2006) e Lim e Khalili (2010), ensaios como o *Slot Erosion Test (SET)*, o *Hole Erosion Test (HET)*, de Wan (2006), Wan e Fell (2002, 2004a,b, e Bonelli *et al.* (2007), e o ensaio *Jet Erosion Test (JET)*, de autores como Hanson (1990,1991) e Hanson e Cook (2004) (ICOLD, 2016).

Para além dos ensaios mencionados, destacam-se a nível nacional os trabalhos desenvolvidos por Maranha das Neves (1991) e Santos, R. (2014) no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Maranha das Neves desenvolveu o ensaio de erosão ao longo de fendas e Santos, R. (2014) desenvolveram os ensaios FLET e CFET, baseados no ensaio HET, no sentido de averiguar a probabilidade de certos materiais, colocados a montante do núcleo fissurado, restringirem os fluxos ou preencherem as fendas e, consequentemente, parar a erosão interna.

Seguidamente, descrevem-se os seguintes ensaios: *Pinhole*, Ensaio de erosão de fissuras; HET; FLET e CFET, CET.

3.1. Ensaio Pinhole

A dispersividade dos materiais argilosos pode ser encarada como um parâmetro chave no dimensionamento dos materiais de filtro. Um dos ensaios mais realizados é o ensaio *Pinhole* ou também designado por ensaios *Sherard Pinhole*, que, de acordo com os critérios estabelecidos por Sherard, possibilita caracterizar os solos (Tabela 3.1 de Caldeira, 2018).

O ensaio inicia-se quando ocorre percolação de água destilada (com uma carga hidráulica de 50 mm), ao

longo de uma amostra, de 38 mm de comprimento, perfurada com um diâmetro de 1 mm. A duração do ensaio é relativamente curta, de 5 ou 10 minutos, e durante o procedimento de ensaio é analisada a turbidez da água, o diâmetro do furo e a taxa de fluxo (Figura 6 de Caldeira, 2018).

Tabela 3.1 – Classificação dos solos de acordo com ASTM (D4647-93).

Classificação	Carga [mm]	Tempo [min]	Caudal [ml/s]	Turbidez do fluxo	
				De frente	De lado
D1	50	5	1,0-1,4	Opaca	Muito opaca
D2	50	10	1,0-1,4	Moderadamente opaca	Opaca
ND4	50	10	0,8-1,0	Turva	Moderadamente opaca
ND3	180	5	1,4-2,7	Ligeiramente turva	Turva
	380	5	1,8-3,2		
ND2	1020	5	>3,0	Límpida	Ligeiramente turva
ND1	1020	5	≤3,0	Perfeitamente límpida	Perfeitamente límpida

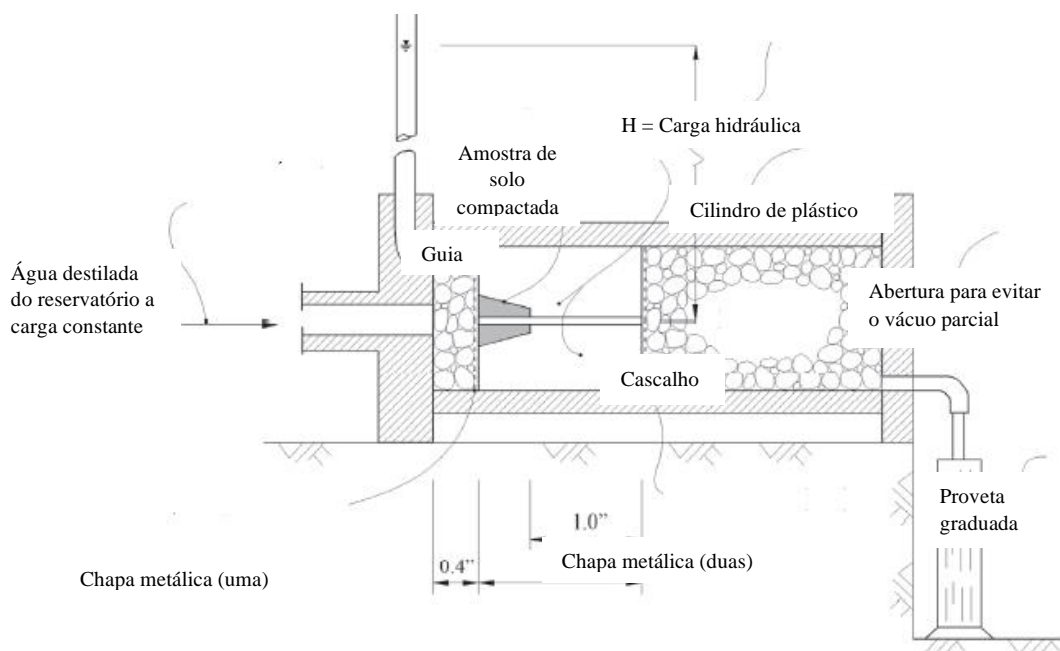


Figura 6 – Ensaio de *Pinhole*, (adaptado de Caldeira, 2018).

3.2. Ensaio de erosão de fissuras

O ensaio de erosão de fissuras, desenvolvido por Maranha das Neves (1991) no LNEC, permite simular um

escoamento ao longo de uma fissura e ainda a observação direta da erosão. Apresenta como principais objetivos analisar a erosão ao longo da fissura, o comportamento do material de filtro e a relação entre ambos.

Para realizar o ensaio é necessário compactar a amostra de solo num molde Proctor (com a energia e com o teor de água desejado) e dividir o provete em dois semicilindros.

Diante disso, um dos hemicilindros é colocado numa câmara, juntamente com burgau a montante e material de filtro a jusante (com geotêxtil nas transições). A tampa da câmara irá materializar uma das fronteiras da fissura e assim definir a abertura da fissura. O material utilizado para a tampa é transparente, do tipo *perspex*, para permitir a observação direta da erosão. A câmara possibilita a conexão com um sistema hidráulico e possui dois piezómetros que permitem avaliar a perda de carga ao longo do escoamento (Figura 7).

Durante a realização do ensaio, é medido o caudal, assim como são registadas as cargas piezométricas. Para além disso, o equipamento permite analisar o material erodido e o comportamento do filtro.

Após o ensaio, a câmara é aberta e o material de filtro é analisado, assim como a água recolhida a jusante com o intuito de quantificar o material erodido (Maranha das Neves, 1991).

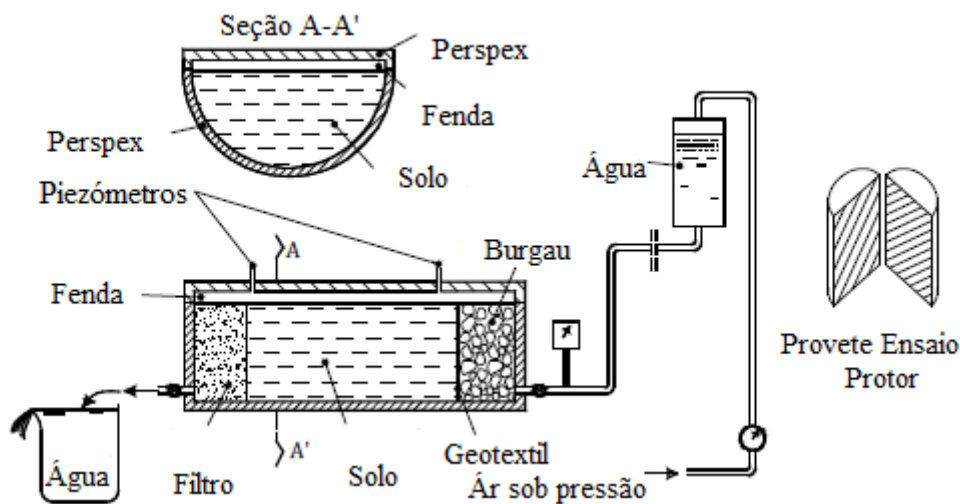


Figura 7 - Esquema ensaio de erosão de fissuras, (adaptado de Santos, R. 2014).

Para uma fenda simulada entre dois planos paralelos, Kovács (1981) propõe a seguinte expressão para a determinação do gradiente hidráulico num escoamento em regime turbulento (Maranha das Neves, 1991):

$$I^{3/4} = \left(1,25 \frac{v}{K_1}\right)^{3/4} + \left(\frac{0,01 v^2}{g\mu K_1}\right)^{3/4} \quad (3.3)$$

com,

$$K_1 = \frac{gL^2}{12\mu} \quad (3.4)$$

onde,

I = gradiente hidráulico (-);

v = velocidade (m/s);

K_1 = condutividade hidráulica da fenda;

g = aceleração da gravidade (m/s²);

μ = viscosidade cinemática do fluido (Pa.s);

L = comprimento da fenda (m);

A velocidade pode ser estimada inicialmente, com a secção inicial da fissura, e no fim do ensaio, com a secção final, considerando caudais médios.

Segundo a mesma referência, em regime laminar, o gradiente hidráulico pode ser expresso por:

$$I^{3/4} = 1,25 \frac{v}{K_1} \quad (3.5)$$

3.3. Ensaio HET (*Hole Erosion Test*)

O *Hole Erosion Test* é um dos ensaios mais utilizados para a análise da suscetibilidade a este fenómeno. Consiste num ensaio laboratorial que permite estimar a tensão de corte crítica do material erodido num procedimento de ensaio, no qual se submete um determinado provete a um determinado gradiente. A amostra inicialmente é compactada num molde e perfurada com um berbequim, recriando um cenário de erosão tubular, que se pretende ser representativo também da erosão ao longo de fendas. De seguida, o provete e o molde são inseridos na célula de ensaio, e é estabelecida a ligação com o sistema hidráulico (Figura 8, de Santos *et al.*, 2010).

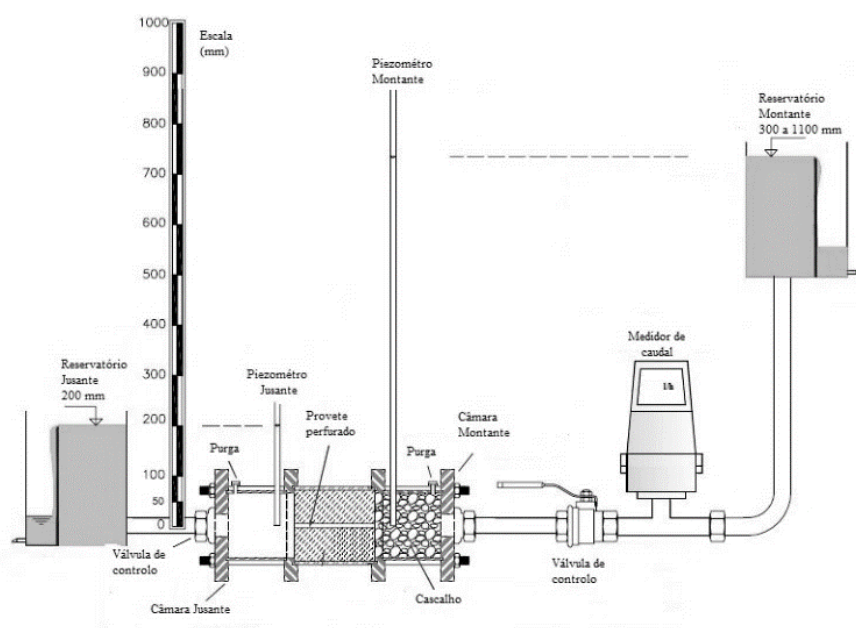


Figura 8 – Esquema de ensaio HET (adaptado de Santos *et al.*, 2010).

Durante o procedimento de ensaio, é possível observar visualmente o aumento das dimensões do tubo e registrar o caudal, assim como as alturas piezométricas (a montante e a jusante). No fim, o provete é removido e é efetuada uma estimativa do diâmetro final (através da determinação do volume de um molde de parafina). Com a variação do diâmetro e as leituras efetuadas durante o procedimento de ensaio é possível definir a taxa de erosão e estimar a tensão de corte crítica (Santos, R. 2014).

Segundo a mesma referência, Wan e Fell (2002, 2004a, b) e Wan (2006) expressam a taxa de erosão, $\dot{\epsilon}$, e o índice de erosão, I_{HET} , pelo logaritmo do coeficiente do solo erodido C_e .

$$\dot{\epsilon} = C_e(\tau - \tau_c) \quad (3.6)$$

$$I_{HET} = -\log(C_e) \quad (3.7)$$

onde,

τ = tensão de corte (N/m^2);

τ_c = tensão de corte crítica que inicia a erosão (N/m^2).

Segundo Wan (2006), em função do valor de I_{HET} determinado, com provetes preparados com o teor de água ótimo e com um grau de compactação 95%, os solos podem ser classificados em diferentes classes de acordo com a Tabela 3.2 e a sua suscetibilidade a fenómenos de erosão interna (ICOLD, 2016).

Tabela 3.2 – Classificação dos solos em função da sua suscetibilidade à erosão (adaptado de ICOLD, 2016, e Wan 2006).

Classe	Índice de erosão	Suscetibilidade à erosão
1	<2	Extremamente rápida
2	2-3	Muito rápida
3	3-4	Moderadamente rápida
4	4-5	Moderadamente lenta
5	5-6	Muito lenta
6	>6	Extremamente lenta

3.4. Ensaio FLET e CFET

Santos *et al.* (2014), baseados no ensaio HET, desenvolveram no LNEC dois ensaios com o intuito de avaliar a capacidade de certos materiais colocados a montante de um tubo permitirem restrição do fluxo ou o preenchimento deste durante o processo de progressão da erosão interna.

O ensaio FLET (*Flow Limitation Erosion Test*) permite investigar o potencial de determinados solos limitarem o fluxo através de tubos. Neste ensaio, a ausência de material de filtro permite avaliar

isoladamente a influência do material de montante, e a perfuração realizada quando estendida ao material de montante permite determinar a contribuição de tubos ou fendas que se atravessam o maciço de montante e o núcleo da barragem (Figura 9).

O ensaio CFET (*Crack-Filing Erosion Test*), é semelhante ao primeiro, porém aborda a questão do material de montante ser capaz de preencher a fuga, dado este material pode ser retido por um filtro que não consegue sustentar o material do núcleo. Assim, neste ensaio é reproduzido o filtro (Figura 10).

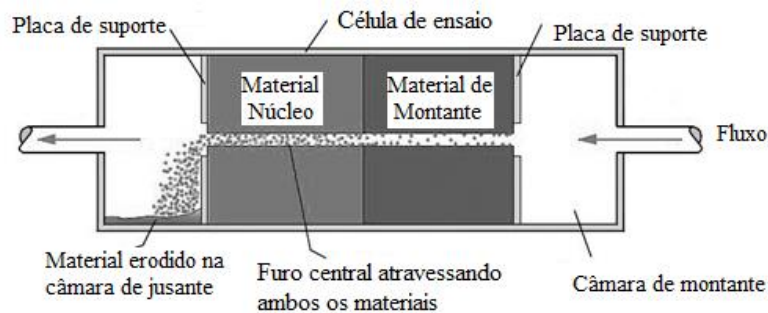


Figura 9 - Célula de ensaio - FLET, adaptado de Santos *et al.* (2014).

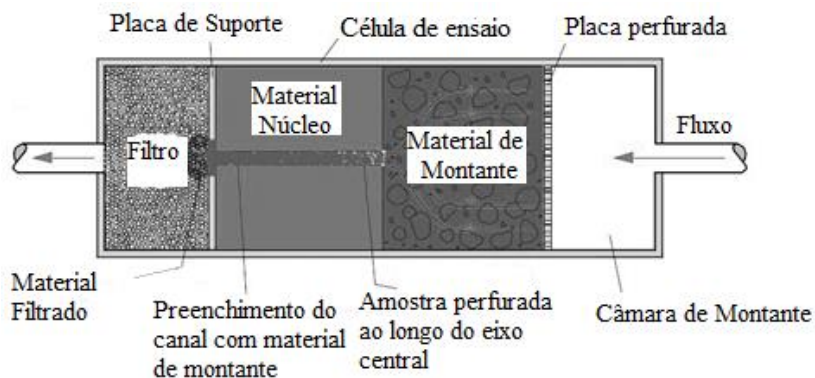


Figura 10 - Célula de ensaio - CFET, adaptado de Santos *et al.* (2014).

A célula de ensaio foi projetada de forma a permitir realizar os dois ensaios. É composta por três peças cilíndricas ocas, que se conectam entre si e que, posteriormente, são fixas pelo exterior através de varões de aço e um conjunto de parafusos e porcas. Cada um dos materiais de ensaio, nomeadamente o material de filtro, o de núcleo e o de material de montante são compactados no interior das respetivas peças (Figura 11).

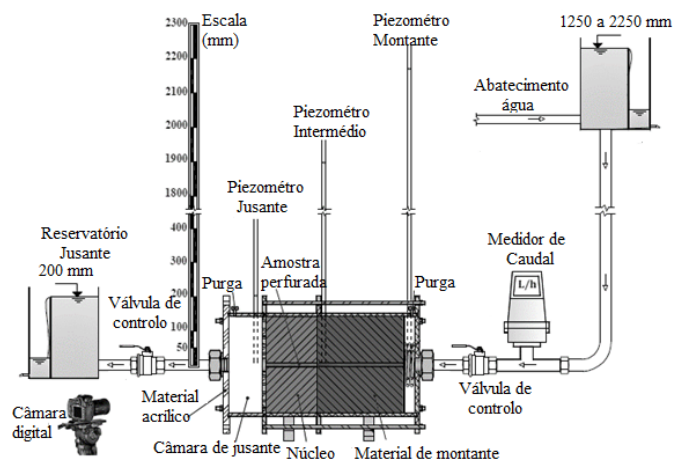


Figura 11 - Esquema de ensaio FLET, adaptado de Santos, R. (2014).

As peças cilíndricas a montante e a jusante possuem válvulas de purga, e tubos piezométricos a montante, a jusante e na interface entre os materiais do núcleo e os de montante, e uma válvula de controlo que permite a ligação ao sistema hidráulico.

O ensaio inicia-se quando é estabelecida a ligação ao sistema hidráulico. Durante o procedimento de ensaio, em intervalos de tempo pré-estabelecidos, são registados o caudal e as alturas piezométricas. Paralelamente, uma câmara digital também regista a turbidez da água. No fim do ensaio, tal como no ensaio HET, as leituras efetuadas e a estimativa do diâmetro final dos tubos em cada um dos materiais permitem estimar taxas de erosão, o comportamento dos solos face à erosão e avaliar a contribuição, ou não, do material de montante (Santos R., 2014).

3.5. Ensaio CET

Para o estudo da fuga concentrada, este trabalho propõe o desenvolvimento do ensaio CET (*Crack Erosion Test*), que tal como o ensaio HET, tem como objetivo estimar os parâmetros de erodibilidade. No entanto, este pretende simular a fenda com uma geometria mais representativa da realidade. No capítulo seguinte são descritos os procedimentos do ensaio e a metodologia de cálculo proposta.

3.6. Ensaio de erosão de fissuras e o ensaio CET

Maranha das Neves (1991), com o intuito de analisar o desempenho do filtro numa situação de fissuração do núcleo, desenvolveu um ensaio de forma a conseguir observar a compatibilidade entre os materiais. Neste sentido, durante o ensaio, é possível visualizar o processo de expansão do núcleo (comum nas argilas), a sua erosão (desprendimento e arraste das partículas) e a sua retenção no filtro.

No ensaio CET, não existe esta preocupação entre a compatibilidade dos materiais, apenas se pretende estimar a resistência do material à erosão. Dada a inexistência de material de filtro a jusante no núcleo, o operador, pela câmara de jusante, pode visualizar ao longo do procedimento experimental a turbidez da água, a quantidade de material erodido e ter uma perceção da dimensão da fenda naquele extremo. Embora

este ensaio permita pior visualização dos processos que ocorrem durante o procedimento experimental (expansão e erosão), permite que o escoamento se dê num meio uniforme, ou seja, apenas no interior da amostra compactada, sendo mais representativo da realidade. Assim como, permite verificar a capacidade sustentação do solo ao longo da fenda (suportar o teto, e permitir a passagem do escoamento).

Além disso, a melhor exposição dos fenômenos também não permite a medição da dimensão da fenda durante o procedimento experimental, pelo que, em ambos os ensaios, apenas é possível medir a espessura final, ou seja, em ambos a análise dependerá da espessura final, da inicial e das leituras efetuadas.

Enquanto que Maranha das Neves (1991) recorrendo à expressão de Darcy, estimou as velocidades inicial e final (com as respetivas dimensões da fenda) e ao ser um espaço entre dois planos paralelos calculou os gradientes hidráulicos de acordo com Kovács (1981), o ensaio CET, propõe uma adaptação ao método desenvolvido por Wan e Fell (2002) e, de forma simples, estima os parâmetros de resistência do solo, nomeadamente a tensão de corte que potencia a erosão e o índice da taxa de erosão que permite classificar o solo e definir um comportamento tipo.

Outro aspeto importante, é a inclinação da fenda, Maranha das Neves (1991) teve em consideração a variação deste parâmetro, enquanto que nos ensaios CET realizados, não existiu esta preocupação. Contudo em ambos é possível analisar este parâmetro.

4. Ensaaios HET e CET

Como mencionado anteriormente, esta dissertação tem como objetivo principal comparar os resultados obtidos nos ensaios HET e CET.

As secções seguintes contemplam a descrição do equipamento, desenvolvido no LNEC, utilizado para ambos os ensaios, e os procedimentos de ensaio, que incluem: a preparação e a compactação do provete, a montagem, as leituras, os critérios de paragem, a desmontagem, as medições e a metodologia de cálculo.

O programa experimental, descrito no capítulo 5, foi desenvolvido tendo em conta as secções seguintes.

4.1. Descrição do equipamento

O equipamento é composto por uma célula de ensaio que se intercala num sistema hidráulico (Figuras 12 e 13). A célula de ensaio é uma câmara cilíndrica, composta por um molde de Proctor em posição central, e duas câmaras de *perspex* a montante e a jusante. A amostra é compactada diretamente no molde utilizado no procedimento de ensaio (molde pequeno e energia correspondente ao ensaio de Proctor normal), cujo diâmetro interno é de 101,6 mm e a altura é de 114,5 mm. Após o processo de compactação, o molde é colocado entre as câmaras de *perspex*. Ambas as câmaras possuem três ligações com o exterior: uma válvula de purga, um piezómetro e uma válvula de controlo para ligação ao sistema hidráulico. A válvula de purga permite a expulsão do ar no processo de saturação das câmaras, o piezómetro permite registar a perda de carga hidráulica do escoamento, e a válvula de controlo permite estabelecer o fluxo de água na célula.

O sistema hidráulico é composto por dois reservatórios e um caudalímetro (Danfoss, Maflo® 6000). O equipamento permite efetuar leituras em tempo real e está limitado a 1 000 l/h. Inicialmente o reservatório de montante é cheio e colocado à altura desejada (de acordo com o gradiente hidráulico pretendido). Os reservatórios de montante e jusante podem estar desnivelados entre 300 a 1100 mm e 200 mm acima do furo ou fenda realizados no material Santos *et al.* (2014).



Figura 12 - Equipamento HET desenvolvido no LNEC.



Figura 13 - Célula de ensaio intercalada no sistema hidráulico, tubos piezométricos instalados a montante e a jusante e correspondente sistema de leitura.

4.2. Preparação e compactação do provete

Para ambos os ensaios, o teor de água e o grau de compactação são os fatores que mais importam no processo inicial. Como tal, o solo deve ser sujeito a um processo de secagem em estufa durante um período de 24 horas, para que, mais tarde, através da adição da massa de água necessária se perfaça o teor de água desejado. A mistura deve ser preservada dentro de um saco hermeticamente fechado, pelo menos 24 horas, para que a homogeneidade da amostra seja garantida (Santos *et al.*, 2014).

Posteriormente, o solo deve ser compactado por apiloamento manual ou automático, com a energia pretendida (Figura 14). Após a compactação, é necessário reduzir a altura do provete, para que seja possível introduzir nas extremidades do molde um disco de geomebrana capaz de garantir que o fluxo se processa durante o ensaio, essencialmente, pelo furo ou pela fenda. Os discos utilizados para os ensaios HET apresentam ao centro um furo circular, e os discos para os ensaios CET uma abertura retangular (Figura 15).

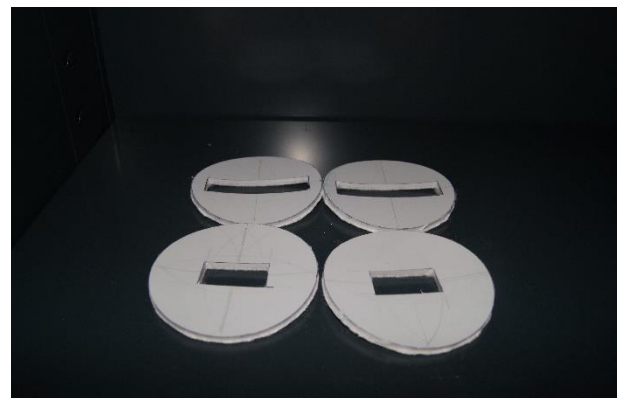
Esta operação foi desenvolvida ao longo deste estudo para que a introdução da geomembra entre o corpo de prova e as câmaras de *perspex* não afetasse as uniões e, assim, a estanquidade da célula de ensaio fosse garantida. Como cada disco apresenta uma espessura de 5 mm, esta espessura deve ser removida de ambos os topos do provete. Para iniciar esta operação, colocam-se os dois discos numa das extremidades do provete/molde. Coloca-se o conjunto no extrator de amostras e empurra-se o conjunto até os discos entrarem no interior do molde (Figura 16(a)). Após a introdução dos dois discos, em cima da bancada, na extremidade oposta, rasa-se o material em excesso (aproximadamente 10 mm). Na face rasada, coloca-se um dos discos e faz-se deslocar novamente o provete 5 mm no sentido inverso, para que este disco fique também no interior do molde (Figura 16(b)). Esta operação reduz a altura do corpo de prova para 104,5 mm, dimensão esta utilizada para efeitos de cálculo.



Figura 14 - Utensílios para a compactação da amostra e discos de geomembrana com geotêxtil.



(a)



(b)

Figura 15 – Geomenbranas com geotêxtil: (a) utilizadas nos ensaios HET; (b) utilizadas nos ensaios CET.



(a)



(b)

Figura 16 - Processo de diminuição da altura do corpo de prova: (a) deslocação do material em excesso, até os dois discos entrarem no interior do molde; (b) disco no interior do molde.

Por fim, para a realização do ensaio HET, é efetuado um furo ao longo do eixo vertical do provete com um berbequim e com uma broca de 6 mm (Figura 17, Santos *et al.*, 2014).



Figura 17 - Sistema de perfuração do provete para o ensaio HET.

Para a realização do ensaio CET, ao longo deste estudo também foi necessário aprimorar uma técnica de perfuração para materializar uma fenda de secção transversalmente constante ao longo do provete. A solução final adotada consiste num sistema mecânico de cravação e de extração de uma lâmina metálica com uma dada espessura. Esta é acionada pelo eixo de um extrator manual de amostras movimentando por um

parafuso sem fim, (Figura 18(a)). A lâmina tem uma secção transversal de $2 \times 60 \text{ mm}^2$ e é suficientemente longa para perfurar todo o provete. Para cravar a lâmina, basta rodar os braços do extrator de amostras, no sentido horário. O molde sobe e automaticamente força a penetração da lâmina ao longo do corpo de prova. Para a extração da lâmina, basta rodar os braços no sentido contrário. Em ambos os movimentos, acautelase a qualidade das superfícies de corte pela baixa velocidade da operação.

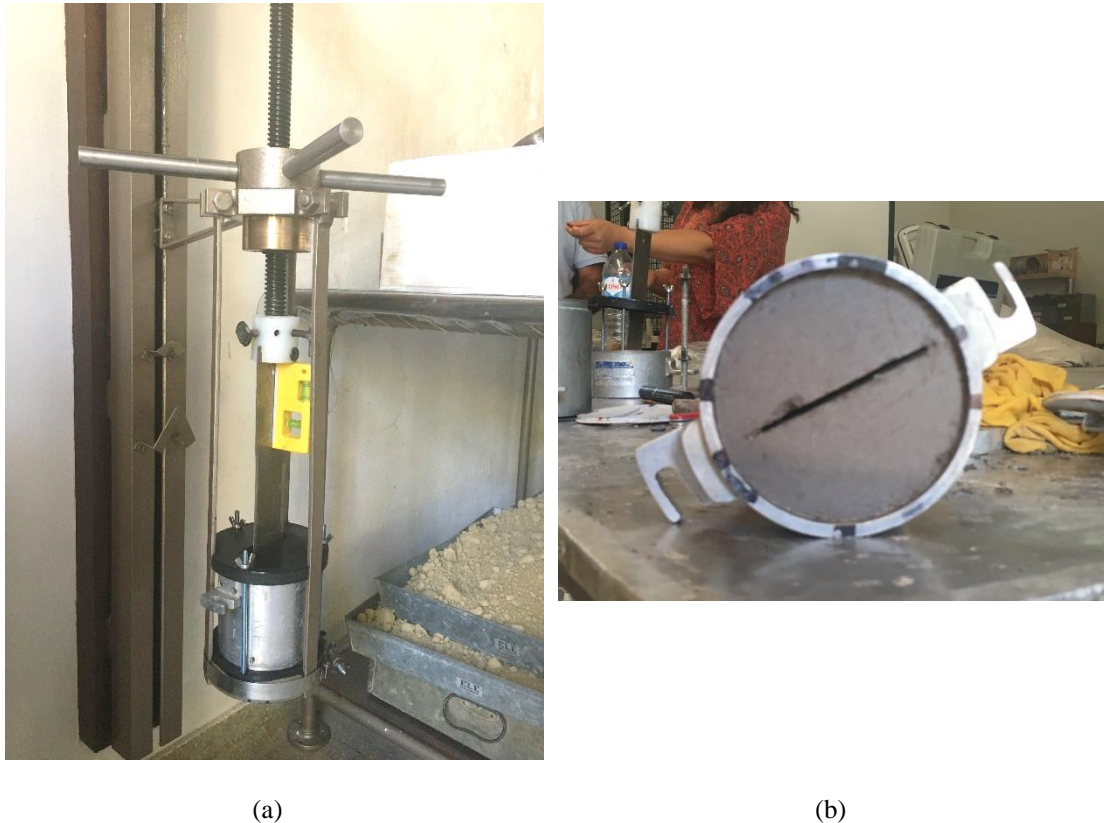


Figura 18 – Sistema de cravação e extração da lâmina para o ensaio CET: (a) sistema fixo ao extrator de amostras; (b) provete perfurado.

4.3. Montagem da célula de ensaio

Para a montagem da célula de ensaio, em primeiro lugar, é necessário colocar material de rolado na câmara de montante para que o escoamento se disperse nesta câmara. De seguida, ao colocar o molde entre as câmaras convém que sejam colocadas chapas metálicas nas interfaces para impedir a movimentação das geomembranas e do material rolado.

A geometria das chapas metálicas, é diferente consoante o ensaio. Para a realização do HET, as chapas metálicas contêm um rasgo circular e para a realização do CET, um rasgo retangular (Figura 19).

A estanquidade entre o molde e as câmaras é assegurada através de *o-rings* nos contactos, e por um conjunto de varões que atravessa os três elementos.

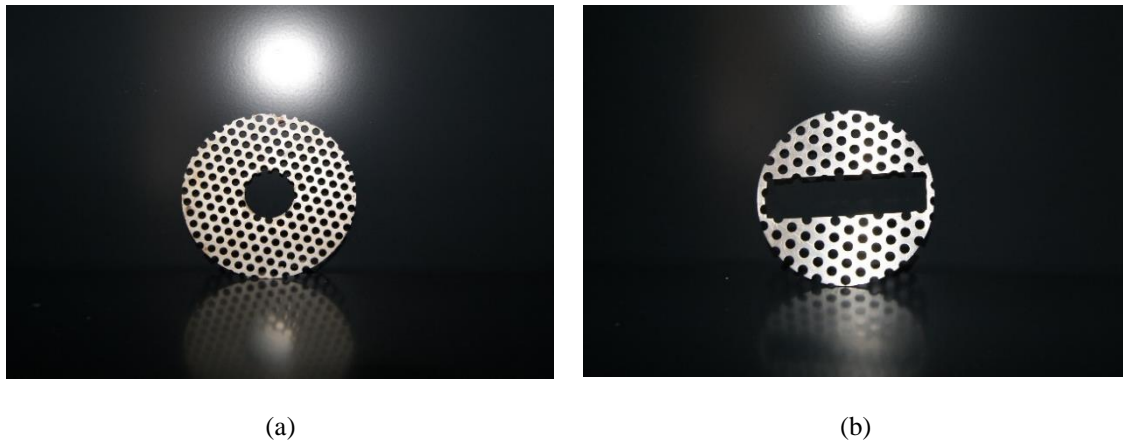


Figura 19 - Chapa metálica: (a) utilizada nos ensaios HET; (b) utilizada nos ensaios CET

A conexão da célula de ensaio com o sistema hidráulico realiza-se pela seguinte sequência de operações:

1. colocação do reservatório de montante e eventualmente, do de jusante à cota pretendida;
2. conexão dos tubos piezométricos à célula de ensaio e abertura das válvulas de purga para a expulsão do ar;
3. abertura lenta das válvulas de controlo, e preenchimento das câmaras com água, e quando preenchidas, fecho das válvulas de purga;
4. abertura das válvulas de controlo e acionamento do temporizador.

4.4. Leituras

As leituras devem ser realizadas, inicialmente, com um intervalo de 30 segundos, aumentando gradualmente de 1 para 2 e 5 minutos, consoante a variação do caudal. Quando este estabilizar (três leituras constantes) a frequência pode diminuir (Santos *et al.*, 2014).

4.5. Critérios de paragem

O critério de paragem do ensaio considerado no programa experimental resulta da ocorrência de, pelo menos, uma das seguintes situações (Santos *et al.*, 2014):

1. duração máxima de três horas, por questões práticas;
2. caudal igual a 1 000 litros por hora, por escoamento da capacidade do sistema hidráulico;
3. diâmetro do furo igual a 25mm/ espessura da fenda igual a 3 vezes a abertura inicial;
4. colapso ou obstrução do orifício ou da fenda.

4.6. Desmontagem da célula e medições

Para a desmontagem, a célula deve ser lentamente esvaziada, através do reservatório de jusante. Após este

procedimento, podem ser retirados os parafusos borboleta e os quatro varões de aço que fixam o molde às câmaras. Retira-se o molde e, em cima da bancada, introduz-se parafina líquida no interior do tubo ou da fenda. Quando esta solidificar, retira-se, cuidadosamente, o material da amostra. O molde de parafina permite visualmente analisar aspetos como a geometria final do tubo ou da fenda, o volume de material erodido e a rugosidade gerada pela erosão interna nas paredes do tubo ou da fenda, assim como proceder a uma análise quantitativa, através da determinação do diâmetro final equivalente do furo ou da abertura final equivalente da fenda a partir da determinação do volume (Santos *et al.* 2014).

4.7. Metodologia de cálculo para o HET

No fim de cada ensaio, com o diâmetro equivalente obtido através da determinação do volume do molde de parafina e com as leituras efetuadas durante o procedimento de ensaio é possível analisar os resultados com base na teoria da mecânica dos fluidos. Nesta, o equilíbrio das forças estabelecido por White (1998) pode ser expresso pelas equações (4.1) e (4.2), (Figura 20, Santos *et al.* 2014):

$$\Delta h(t) = \Delta z + \frac{\Delta p(t)}{\rho_w g} = \frac{4\tau(t)}{\rho_w g} \frac{L}{D(t)} \quad (4.1)$$

$$\Delta h(t) = i(t) \cdot L \quad (4.2)$$

onde, para um instante t ,

$\Delta h(t)$ = diferença de carga (m);

Δz = desnível entre as extremidades do tubo (m);

$\Delta p(t)$ = variação da pressão entre as extremidades do tubo (N/m^2);

ρ_w = massa volúmica da água (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

$\tau(t)$ = tensão de corte gerada nas paredes do tubo (N/m^2);

L = comprimento do tubo (m);

$D(t)$ = diâmetro do tubo (m);

$i(t)$ = gradiente hidráulico ao longo do tubo (-).

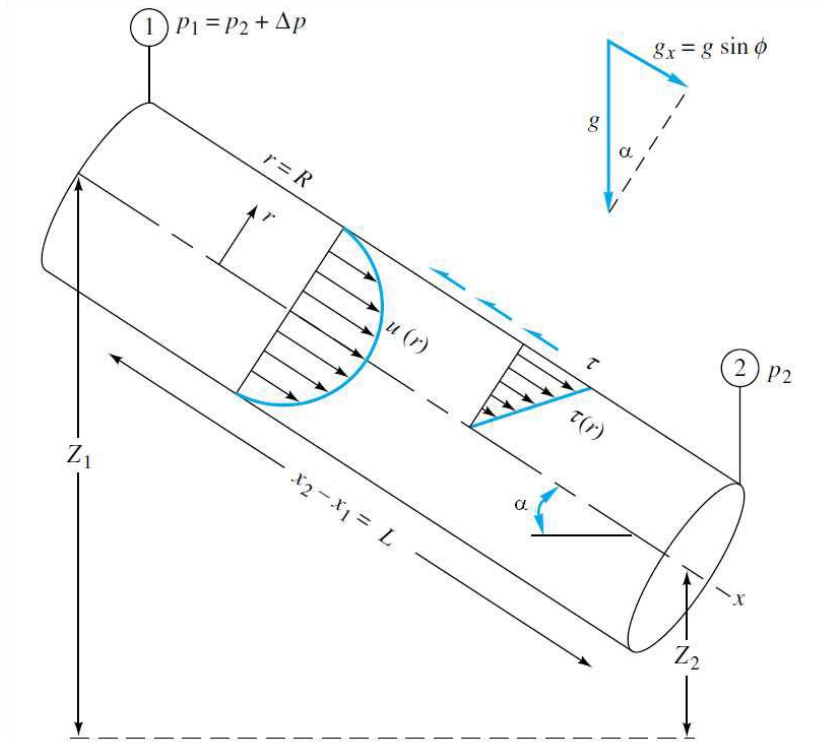


Figura 20 - Volume de controle para um escoamento sob pressão entre duas seções de um tubo inclinado (adaptado de Santos *et al.*, 2014 a partir de White, 1998).

Contudo, como o ensaio é realizado com o provete disposto na horizontal e não existe desnível entre as extremidades do tubo ($\Delta z = 0$), a tensão de corte pode ser expressa por:

$$\tau(t) = \rho_w \cdot g \cdot i(t) \cdot \frac{D(t)}{4} \quad (4.3)$$

Segundo o mesmo autor, para Wan e Fell (2002) a tensão corte, para cada instante de tempo, também pode ser expressa pelo fator de atrito de Darcy, $f(t)$, e pela velocidade do escoamento, $\bar{v}(t)$, ou seja, pela equação seguinte, quando o escoamento decorre em regime laminar:

$$\tau(t) = f_L(t) \cdot \bar{v}(t) \quad (4.4)$$

Ou pela equação seguinte, quando decorre em regime turbulento.

$$\tau(t) = f_T(t) \cdot \bar{v}(t)^2 \quad (4.5)$$

A taxa de erosão no ensaio pode ser definida pela massa de material removido das paredes do tubo por unidade de tempo e de área da superfície do tubo, através das seguintes equações:

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{1}{\psi(t)} \frac{dM(t)}{d(t)} \quad (4.6)$$

com

$$\psi(t) = P_w(t) \cdot L \quad (4.7)$$

$$dM(t) = \rho_d \cdot L \cdot dA(t) \quad (4.8)$$

ou seja,

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\rho_d}{P_w(t)} \frac{dA(t)}{d(t)} \quad (4.9)$$

onde, para um instante t,

$\dot{\varepsilon}(t)$ = taxa de erosão ($kg/s/m^2$);

$\psi(t)$ = área da superfície interior do tubo (m^2);

$\frac{dM_t}{dt}$ = taxa da massa de solo removida devido à erosão (kg/s);

$P_w(t)$ = perímetro molhado do tubo (m);

ρ_d = massa volúmica seca do solo (kN/m^3);

$A(t)$ = área transversal (m^2).

Sendo o tubo de erosão circular, efetuando as respetivas substituições, na equação (4.9), obtém-se:

$$\frac{dA(t)}{d(t)} = \frac{d}{d(t)} \left(\frac{\pi D(t)^2}{4} \right) = \frac{\pi}{2} D(t) \frac{dD(t)}{d(t)} \quad (4.10)$$

$$P_w = \pi D(t) \quad (4.11)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\rho_d}{2} \frac{dD(t)}{d(t)} \quad (4.12)$$

Dada a dependência relativamente ao diâmetro instantâneo e a impossibilidade da sua medição ao longo do ensaio, é necessário proceder à sua estimativa com base nos restantes dados. Em primeiro lugar, é necessário conhecer o diâmetro final. Depois, são calculados os fatores de atrito de Darcy para ambos os regimes, ($f_L(t)$ (kg/m) e $f_T(t)$ ($kg/m^2 \cdot s$)). Separadamente, são calculados os fatores de atrito para o instante inicial e final (com o diâmetro inicial e final), pelas equações seguintes, e para os instantes intermédios é assumida uma variação linear entre os fatores inicial e final.

$$f_L(t) = \frac{\rho_w \cdot g \cdot \pi \cdot i_t \cdot D_t^3}{16 \cdot Q_t} \quad (4.13)$$

$$f_T(t) = \frac{\rho_w \cdot g \cdot \pi^2 \cdot i_t \cdot D_t^5}{64 \cdot Q_t^2} \quad (4.14)$$

Deste modo, definem-se os diâmetros instantâneos, com as equações seguintes e as respetivas velocidades que permitem calcular o número de Reynolds e definir o regime do escoamento. Para números de

Reynolds, R_e , inferiores a 5 000, considera-se que o regime é laminar, e para valores superiores é turbulento (Santos *et al.*, 2014).

$$D_L(t) = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot Q(t) \cdot f_L(t)}{\pi \cdot \rho_w \cdot g \cdot i(t)}} \quad (4.15)$$

$$D_T(t) = \sqrt[5]{\frac{64 \cdot Q(t)^2 \cdot f_T(t)}{\pi^2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot i(t)}} \quad (4.16)$$

Para números de Reynolds, R_e , inferiores a 5 000, considera-se que o regime é laminar, e para valores superiores é turbulento (Santos, 2014).

$$\bar{u}(t) = \frac{4Q(t)}{\pi D(t)^2} \quad (4.17)$$

$$R_e = \frac{\rho_w \cdot \bar{u}(t) \cdot D(t)}{\mu} \quad (4.18)$$

onde, num instante t ,

$Q(t)$ = caudal (m^3/s);

$\bar{u}(t)$ = velocidade do escoamento (m/s);

μ = viscosidade cinemática ($Pa \cdot s$)

Após a determinação do regime do escoamento, é necessário estimar a taxa de erosão $\dot{\epsilon}(t)$, e a tensão de corte $\tau(t)$ ao longo do ensaio. Para a estimativa da taxa de erosão, os autores propuseram ajustar uma função polinomial à variação do diâmetro do tubo. Para tal, com a ferramenta de cálculo do Excel, define-se uma função polinomial, que fornece uma estimativa ajustada do diâmetro e permite estimar a taxa de erosão, $\dot{\epsilon}(t)$, quando derivada, utilizando a equação (4.12) (Figura 21). Determina-se, seguidamente, a tensão de corte, $\tau(t)$, através da equação (4.3).

Por fim, representa-se graficamente a tensão de corte, $\tau(t)$, em função da taxa de erosão, $\dot{\epsilon}(t)$, e faz-se passar uma reta tangente ao gráfico no trecho em que se verifica aumento monótono da taxa de erosão (Figura 22). A tensão de corte crítica, $\tau_c(t)$, é dada pela interseção desta reta com o eixo das abcissas e o índice da taxa de erodibilidade, I_{HET} , é determinado com base no declive da reta. O declive é designado como o coeficiente de erosão do solo, C_e , e o I_{HET} é definido como $-\log(C_e)$. No exemplo da Figura 22, a taxa de erosão, C_e , é 0,000081, e o índice da taxa de erodibilidade, I_{HET} , e a tensão de corte crítica assumem os valores de 4,09 e 90,4 Pa.

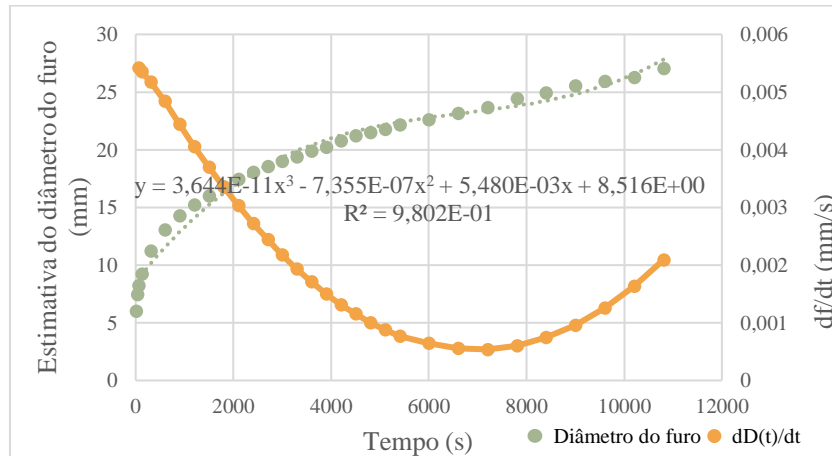


Figura 21 – Exemplo da estimativa da evolução do diâmetro do tubo.

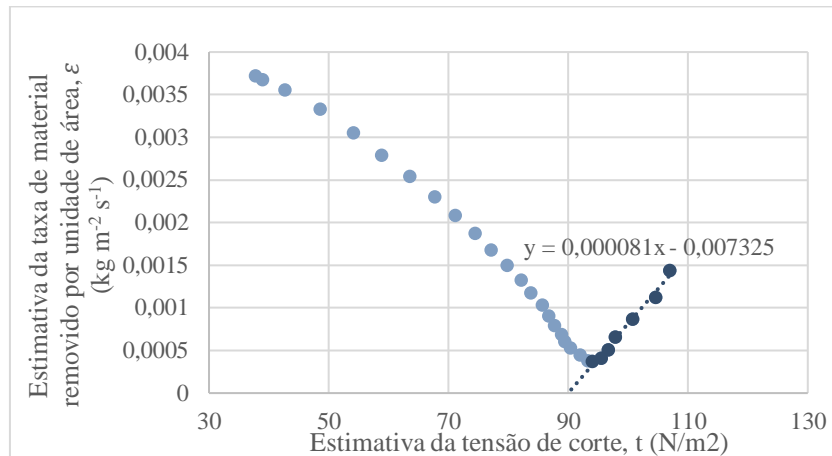


Figura 22 – Exemplo da estimativa da taxa de erosão e da tensão de corte crítica τ_c .

4.8. Metodologia de cálculo para o CET

Para secções não circulares, utiliza-se nas expressões anteriores o diâmetro hidráulico, D_h , em substituição do diâmetro do furo, o qual é definido por:

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (4.19)$$

onde,

A = Área da secção de escoamento (m^2);

P_w = Perímetro molhado da secção (m);

No caso de uma fenda retangular com abertura e e largura w , D_h é igual a:

$$D_h = \frac{4(e \cdot w)}{2(e + w)} \quad (4.20)$$

No caso de fendas, dado que, em geral, $e \ll w$, pelo que $e + w \cong w$, tem-se:

$$\tau(t) = \rho_w \cdot g \cdot i(t) \cdot \frac{e(t) \cdot w(t)}{2(e(t) + w(t))} \quad (4.21)$$

$$\tau(t) \cong \rho_w \cdot g \cdot i(t) \cdot \frac{e(t)}{2} \quad (4.22)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\rho_d}{2} \frac{de(t)}{d(t)} \quad (4.23)$$

Para a classificação do regime do escoamento, dada a relação entre a velocidade e a tensão de corte, os fatores correspondentes ao regime laminar e turbulento podem ser deduzidos:

$$\tau(t) = f_l(t) \cdot \bar{v}(t) \quad (4.24)$$

$$f_l(t) = \frac{\rho_w \cdot g \cdot i(t)}{Q(t)} \cdot \frac{(e(t) \cdot w(t))^2}{2(e(t) + w(t))} \cong \frac{\rho_w \cdot g \cdot i(t)}{Q(t)} \cdot \frac{e(t)^2 w(t)}{2} \quad (4.25)$$

Para o regime turbulento:

$$\tau(t) = f_T(t) \cdot \bar{v}(t)^2 \quad (4.26)$$

$$f_T(t) = \frac{\rho_w \cdot g \cdot i(t)}{Q(t)^2} \cdot \frac{(e(t) \cdot w(t))^3}{2(e(t) + w(t))} \cong \frac{\rho_w \cdot g \cdot i(t)}{Q(t)} \cdot \frac{e(t)^3 w(t)^2}{2} \quad (4.27)$$

Admitindo a largura da fenda constante ao longo do procedimento de ensaio, a espessura para os respectivos regimes é dada por:

$$e_L(t) \cong \sqrt{\frac{2 \cdot Q(t) \cdot f_L(t)}{\rho_w \cdot g \cdot i_t \cdot w}} \quad (4.28)$$

$$e_T(t) \cong \sqrt[3]{\frac{2 \cdot Q(t)^2 \cdot f_T(t)}{\rho_w \cdot g \cdot i(t) \cdot w^2}} \quad (4.29)$$

A velocidade, quociente entre o caudal e a área da secção, pode ser expressa por:

$$\bar{v}(t) = \frac{Q(t)}{e(t) \cdot w(t)} \quad (4.30)$$

e o número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho_w \cdot \bar{v}(t)}{\mu} \frac{4(e(t) \cdot w(t))}{2(e(t) + w(t))} \cong \frac{\rho_w \cdot \bar{v}(t) \cdot 2e(t)}{\mu} \quad (4.31)$$

Tal como na metodologia de cálculo do ensaio HET, para a interpretação do ensaio é necessário conhecer a espessura final da fenda.

Depois, é necessário calcular os fatores de atrito para os regimes de escoamento laminar, $f_L(t)$, e turbulento, $f_T(t)$. Para cada regime, são calculados os valores correspondentes aos instantes iniciais e finais e para os instantes intermédios é assumida uma variação linear.

Após isso, calculam-se as espessuras com as equações (4.28) e (4.29), e as velocidades associadas, equação (4.30) e o número de Reynolds (equação 4.31), que permitem caracterizar o regime do escoamento. Posteriormente, de acordo com o regime do escoamento, no programa *Microsoft Office Excel*, é ajustada/definida uma função polinomial. A função que permite definir a espessura da fenda ao longo do tempo, e, quando derivada, definir a taxa de erosão, $\dot{\epsilon}(t)$, (equação (4.23)).

Por último, calculando a tensão de corte $\tau(t)$, e representando-a graficamente em função da taxa de erosão, $\dot{\epsilon}(t)$, faz-se passar novamente uma reta tangente, que permite determinar os parâmetros de resistência à erosão, I_{CET} , e τ_c .

5. Estudo experimental

5.1. Considerações iniciais

O estudo experimental, que visa determinar a influência da geometria do tubo ou da fenda na obtenção dos parâmetros de erodibilidade através dos ensaios HET e CET, foi realizado no Departamento de Geotecnia, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, que facultou o uso de todos os equipamentos indispensáveis para o presente estudo, assim como, proporcionou um grande acompanhamento técnico.

O trabalho experimental decorreu sempre com o envolvimento e participação da autora. Numa primeira fase procurou conhecer fisicamente os materiais ensaiados e numa segunda fase analisar a erodibilidade dos mesmos, em função da secção do tubo ou da fenda.

Com o propósito de serem analisados solos expectavelmente contrastantes do ponto de vista da erodibilidade, foram considerados quatro solos: um solo arenoso (A), um solo siltoso (B), um solo argiloso (C) e argila pura de caulinite de *Speswhite* (D). A areia (A) e o silte (B) são provenientes de áreas de empréstimo, enquanto a argila C e o caulino D são produzidos industrialmente, pelo que, deste modo, facilmente obtidos e reproduzidos em futuros ensaios.

Para a compreensão das principais características físicas intrínsecas dos solos, foram realizados os seguintes ensaios normalizados: análise granulométrica, determinação dos limites de consistência, determinação da densidade das partículas e o ensaio de compactação Proctor normal. Posteriormente, de acordo com a metodologia mencionada no capítulo 4, foram realizados os ensaios HET e CET.

A caracterização dos solos e os resultados obtidos nos ensaios HET são apresentados no capítulo 6, tal como é descrito todo o aperfeiçoamento do ensaio CET, e a análise da respetiva erosão.

5.2. Ensaios de identificação

5.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica permitiu quantificar a gama das dimensões das partículas que constituem as amostras alvo de estudo.

Dada a extensa granulometria dos solos A e B, foi necessário *a priori* prepará-los de acordo com a especificação LNEC E 195-1966, para realizar a peneiração das partículas inferiores a 4,76 mm (dimensão máxima das partículas para a realização dos ensaios HET e CET, Figura 23). Os materiais C e D (argila e caulino) não foi necessária qualquer preparação prévia.

De acordo com a especificação do LNEC E 196-1966, quantificou-se a massa partículas com dimensões entre 0,001 mm e 4,75 mm. Para as partículas superiores a 0,075 mm foi realizado o ensaio de peneiração e, para as partículas de menor dimensão, o ensaio de sedimentação, baseado na lei de Stokes. Para esta

análise procedeu-se previamente à aplicação de antifloculante (7 g de carbonato de sódio e 33 g de hexametáfosfato de sódio), Figura 24(a). A peneiração foi realizada manualmente. No ensaio de sedimentação a temperatura foi sempre controlada e todas as pesagens foram realizadas na mesma balança.



Figura 23 - Peneiração da amostra B no peneiro n°4 (malha de dimensão 4,75mm).



(a)



(b)

Figura 24 - Etapas do ensaio de sedimentação: (a) suspensão das partículas; (b) peneiração do material retido no peneiro n°200, que abrange partículas de dimensões entre 75 e 2000 μm .

5.2.2. Limites de Consistência

A determinação dos limites de consistência ou de Atterberg é essencial para a avaliação da influência do teor em água nas propriedades da fração fina dos solos. O ensaio, descrito pela norma NP 143 – 1969, permitiu estimar as fronteiras entre os comportamentos tipicamente designados por semissólido/plástico e plástico/líquido (Figura 25). As fronteiras, também designadas por limite de liquidez (w_L) e o limite de plasticidade (w_P), foram determinadas separadamente através de quatro misturas de solo com variação do

teor de água destilada somente com as partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm, que correspondem ao material passado no nº 40 da série ASTM.

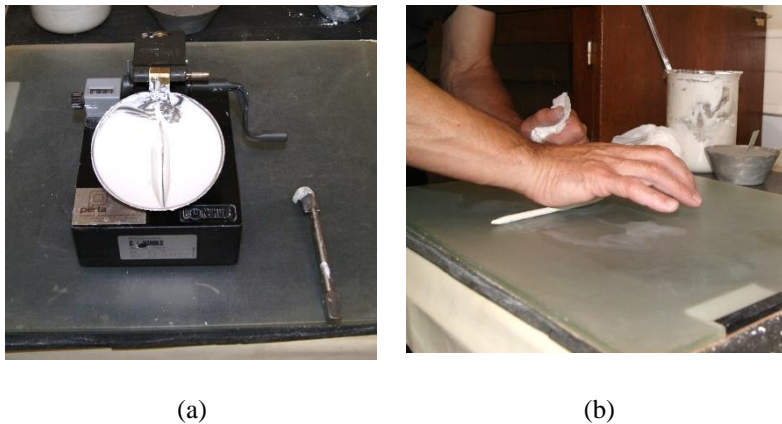


Figura 25 – Limites de consistência: (a) limite de liquidez, com a utilização da concha de Casagrande; (b) limite de plasticidade.

5.2.3. Ensaio de determinação da densidade das partículas

A densidade das partículas é definida como o quociente entre o peso volúmico das partículas e o peso volúmico de referência da água em condições padrão. Esta grandeza adimensional, que simboliza a densidade média das partículas sólidas (G_s) foi determinada com base na norma NP 83-1965, através de picnómetros de capacidade de 100 cm³ e água destilada, (Figura 26).



Figura 26 – Exemplo dos picnómetros preenchidos com 25 g do solo D e água destilada.

5.3. Ensaio de compactação

A realização do ensaio de compactação do tipo Proctor para cada um dos solos visava caracterizar a influência do teor de água no arranjo das partículas de solo, logo a compacidade obtida com uma energia padrão de compactação. Para todas as amostras, foram realizados ensaios Proctor com compactação do tipo leve, em molde pequeno, com o material passado no peneiro de 4,76 mm (nº 4), de acordo com a especificação LNEC E 197-1966 indica (Figura 27).

Para a argila C e o caulino D, dada a natureza mineralógica e a dimensão das partículas, a preparação foi

demorada pela necessidade de garantir a homogeneização do teor de água. O material foi preparado com um teor de água e deixado dentro de sacos de plástico durante vários dias em câmara saturada. Os pontos foram obtidos pela adição ou secagem ao ar, garantindo sempre a homogeneização prévia.

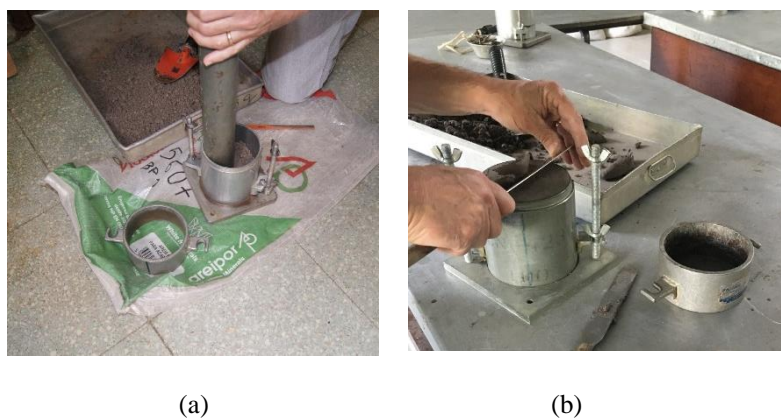


Figura 27 - Ensaio de compactação do solo C: (a) processo de aplicação de energia à primeira camada; (b) rasamento do molde para cálculo do peso volúmico.

5.4. Ensaios HET e CET

Para a análise da influência da geometria do tubo ou da fenda na estimativa dos parâmetros de erodibilidade, foram realizados trinta e seis ensaios HET e CET (Tabela 5.1). Numa visão geral, por motivos apresentados no capítulo 6, dos quinze ensaios HET realizados, somente sete permitiram a determinação dos parâmetros de erodibilidade. Em contrapartida, nenhum dos ensaios CET, permitiu a quantificação dos mesmos. No entanto, todos os ensaios realizados contribuíram para o aperfeiçoamento da metodologia do ensaio, assim como permitiram uma análise da erosão interna.

Tabela 5.1 – Número de ensaios realizados.

Solo	HET	CET
A	1	5
B	5	1
C	5	11
D	4	3

5.4.1. Ensaio HET

Para a realização e a análise dos ensaios HET aplicaram-se todos os procedimentos mencionados no capítulo 4.

Os procedimentos de preparação do provete exigiram uma atenção extra comparativamente com os

procedimentos de preparação convencionais. Após ter-se constatado a necessidade do uso de uma geomembrana, em vez do geotêxtil tradicional, foi necessário reduzir o comprimento do corpo de prova para que a aplicação das geomembranas com geotêxtil na célula de ensaio fosse possível.

Refere-se que cada ensaio exigia um significativo número de horas para a execução da totalidade dos trabalhos de preparação (condicionamento e compactação), montagem, HET, desmontagem e medição do volume de erosão.

5.4.2. Ensaio CET

Para a estimativa dos parâmetros de erodibilidade através do ensaio CET, ao longo do estudo foi necessário desenvolver procedimentos de preparação, nomeadamente da execução da fenda, e de metodologia de cálculo/ interpretação.

Quanto à execução da fenda, experimentaram-se várias técnicas, como a penetração manual de uma espátula, a utilização de uma faca, ou até mesmo a utilização de um engenho de furação (Figura 28(a), Figura 28(b) e Figura 29), mas todas as metodologias apresentavam desvantagens relativas.

Os métodos de cravação, para além de exigirem muito tempo, força e precisão, adensavam demasiado o material adjacente, criando superfícies lisas, totalmente espelhadas, que aumentam a resistência à erosão do material.

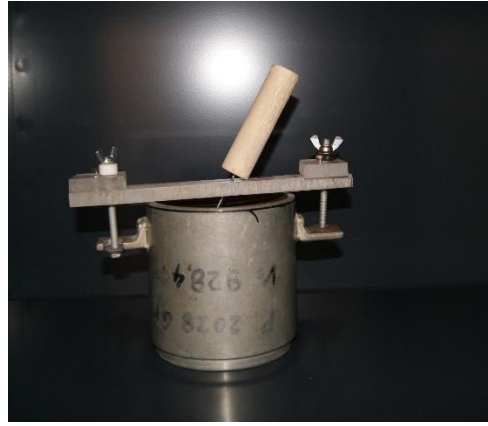
O método de remoção com a broca aplicada no engenho de furação evitava esse adensamento, pois permitia a limpeza do material que ocupava a posição da fenda, garantia a verticalidade, era de execução mais fácil e rápida. No entanto, introduzia irregularidades ao longo da secção, influenciando o escoamento e potenciando o desenvolvimento preferencial de erosão nas irregularidades.

Refletindo sobre os todos os inconvenientes associados a cada um dos métodos, e admitindo que ambos podem ter influência nos resultados, por fim optou-se por desenvolver um sistema de cravação que fosse reprodutível para todos os ensaios, e fácil de executar do ponto de vista do operador – o sistema de cravação e de extração da lâmina (Figura 30). Este permitiu a simplificar as operações e reduzir o tempo de preparação. No entanto, apesar de ter contribuído para a redução do tempo de execução da fenda, à semelhança com o ensaio HET, os ensaios CET exigiram também muitas horas de trabalho.

A metodologia de cálculo apresentada no capítulo 4, baseada na metodologia desenvolvida por Wan e Fell (2002) para o ensaio HET, visou estimar a evolução da espessura da fenda ao longo do ensaio e os parâmetros de erodibilidade. Todavia, não foi possível empregá-la, na totalidade porque as amostras não se comportaram de modo a possibilitar a aplicação do método desenvolvido. Dado este desfecho, no capítulo seguinte, procede-se a uma análise dos resultados obtidos e propõe-se um método alternativo de interpretação.

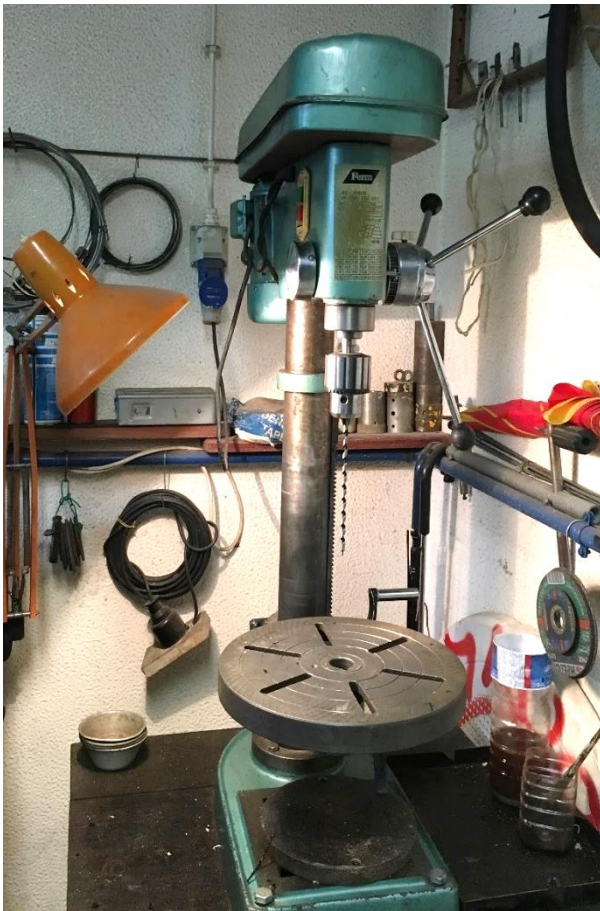


(a)



(b)

Figura 28 – Instrumentos para a perfuração do provete: (a) espátula; (b) guia e faca.



(a)



(b)



(c)

Figura 29 - Perfuração do provete: (a) engenho de perfuração; (b) guia; (c) provete perfurado.



(a)



(b)

Figura 30 - Sistema de cravação e de extração da lâmina: (a) sistema fixo ao extrator de amostras; (b) suporte do molde, chapa circular que fixa o suporte às hastes do extrator e lâmina com nível.

6. Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo, tendo em vista o objetivo inicial do estudo experimental, são apresentados todos os resultados por ordem de execução, o seu tratamento e a respetiva análise.

6.1. Ensaios de caracterização

Os resultados obtidos com a realização dos ensaios de peneiração e de sedimentação, normalizados, às amostras alvo de estudo, são reproduzidos nas curvas granulométricas presentes na Figura 31.

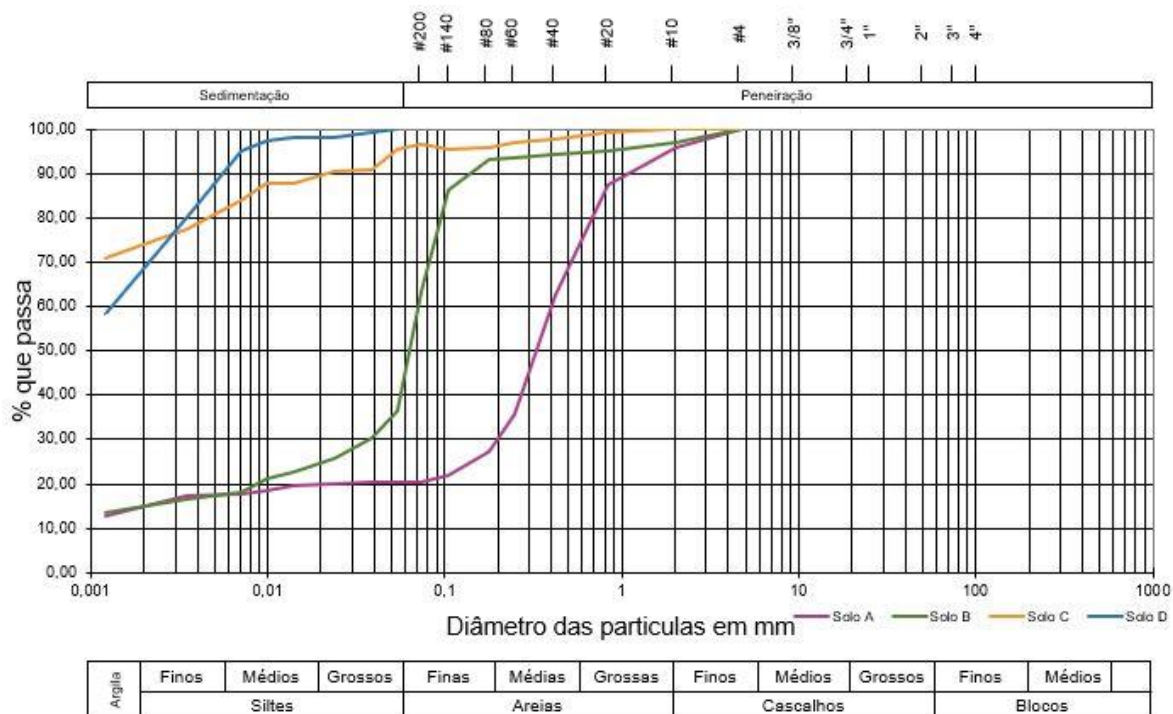


Figura 31 - Curvas granulométricas dos solos A, B, C e D.

As curvas granulométricas estão representadas num gráfico semi logarítmico, cujo eixo das abcissas indica o diâmetro equivalente das partículas (em milímetros), e o eixo das ordenadas, a percentagem do material que passa pelos peneiros, ou de dimensão inferior ao diâmetro indicado no eixo das abcissas.

Após os procedimentos exigidos pela norma, as pesagens realizadas conduziram aos limites de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_P) indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Limites de consistência das amostras A, B, C e D.

Solo	w_L (%)	w_P (%)	IP (%)
A	17,5	NP	NP

B	30,0	23,7	6,3
C	63,4	25,7	37,7
D	56,1	30,5	25,6

De acordo com a Classificação Unificada revista (ASTM D-2487-85), com as curvas granulométricas acima apresentadas e os limites de consistência referidos, foram atribuídas às amostras em estudo, as seguintes classificações, Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Classificação das amostras.

Solo	Classificação
A	SC-SM – Areia argilo-siltosa
B	ML – Silte arenoso
C	CH - Argila gorda
D	CH - Argila gorda

6.2. Ensaio de densidade de partículas

Os valores da densidade (G_s) das partículas sólidas das amostras em estudo estão resumidas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Densidade das partículas sólidas das amostras.

Solo	G_s
A	2,67
B	2,71
C	2,65
D	2,62

Os solos A e B ao conterem maior teor de quartzo na sua composição mineralógica, e carbonatos, no caso do solo B, revelam uma densidade mais elevada que os solos C e D.

No caso dos solos mais finos este parâmetro pode ser influenciado pela união entre as partículas (agregados/flocos), e pela extensa composição química presente no material. Neste caso, os valores obtidos entram-se no intervalo de 2 a 3 estabelecido para o grupo de esmectite (Deer *et al.*, 2010).

6.3. Ensaio de compactação

Para o ensaio de compactação do tipo Proctor, as amostras foram preparadas com diversos teores em água de forma a que fosse possível analisar graficamente o efeito destes no arranjo dos grãos e dos vazios e assim permitir identificar as condições de teor em água ótimo (w_{opt}) e peso volúmico seco máximo (γ_{dmax}). A Tabela 6.4 resume essas condições para os solos ensaiados, (Figura 32).

Tabela 6.4 - Teor em água ótimo e peso volúmico máximo seco associado a cada amostra.

Solo	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)
A	10,3	19,9
B	16,7	16,8
C	26,3	14,7
D	30,7	13,7

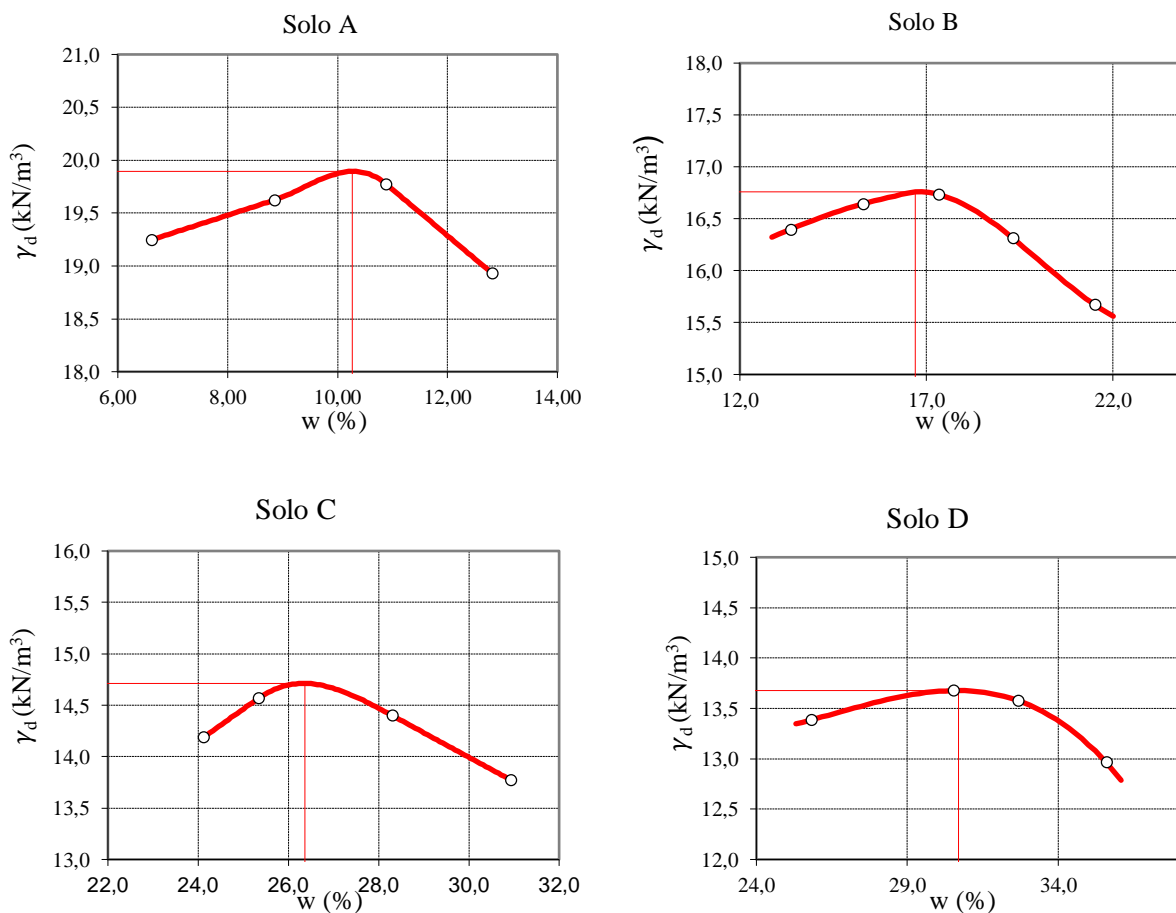


Figura 32 - Curvas de compactação dos solos ensaiados.

Verifica-se o decréscimo do peso volúmico seco, γ_d^{max} , em função do aumento do teor em água. A areia

argilo-siltosa (solo A) e a site arenosa (solo B) apresentam pesos volúmicos maiores, enquanto que as argilas gordas, devido à forte influência do teor em água neste tipo de solos, apresentam valores menores.

6.4. HET

6.4.1. Solo B

Conforme resumido na Tabela 5.1, os primeiros cinco ensaios HET foram realizados com o solo B (silte arenoso). Procurando garantir a estabilidade do furo nos provetes, estes foram preparados na condição ótima do ensaio Proctor e submetidas ao gradiente hidráulico mínimo permitido pelo sistema hidráulico. Observou-se que a água da câmara de jusante rapidamente turvava, o que impossibilitava a visualização do diâmetro do furo. A turbidez presente na câmara afetou a execução dos ensaios, no sentido em que não permitiu a aplicação de um dos critérios de paragem, nomeadamente o da ampliação do furo, Figura 34 (a) e (b).

No início do ensaio, o caudal aumentava progressivamente com a sua posterior estabilização, assim como das leituras piezométricas. No entanto, sem sinal prévio, o caudal aumentava bruscamente, e os provetes ficavam praticamente destruídos (Figura 33).

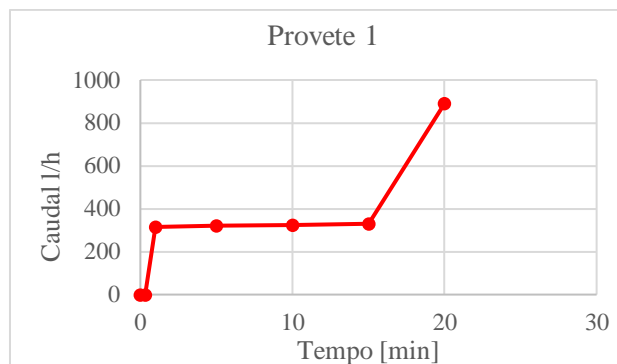


Figura 33 - Evolução do caudal em função do tempo no ensaio HET do solo B.

Com a realização de ensaios de menor duração, foi possível analisar melhor as limitações da capacidade de suporte do furo reveladas por este solo, e ver a evolução do abatimento do teto no sentido jusante-montante no fim dos ensaios. O furo começava a colapsar a jusante com a progressão do fenómeno para montante, até ao seu abatimento total (Figura 35), o que indicava a ocorrência de erosão regressiva e não uniforme ao longo do furo. Na realização destes ensaios, existiu uma maior preocupação na análise visual da evolução do provete ao longo dos ensaios do que no tratamento dos dados obtidos com as leituras efetuadas, uma vez que as hipóteses admitidas na interpretação (alargamento uniforme ao longo da secção do provete ao longo do seu comprimento não eram verificadas).

Na tentativa de assegurar que o escoamento se processasse apenas no furo e que o material adjacente não sofresse saturação, o que levava ao colapso do furo por perda de secção e não de erosão, no último ensaio realizado com o solo B, substituí-se os discos de geotêxtil comumente utilizados neste ensaio (Figura 34(c)), por discos de geomembranas com geotêxtil (por ser o disponível), com o intuito de proteger o provete. No

Estudo experimental com o ensaio HET da influência da geometria das fendas no desenvolvimento de erosão interna

entanto, o tipo de resposta do provete não se alterou. O facto de, mesmo após esta alteração, o padrão de resposta se manter, permitiu concluir que o solo é mais suscetível a erodir de forma regressiva do que por meio de fuga concentrada. Tal pode ser explicado por se tratar de um solo mal graduado (com valores de C_u e C_c de aproximadamente 70 e 22, ou seja, a inexistência de partículas com diâmetros equivalentes intermédios, como se pode observar pela curva granulométrica, dificulta a retenção das partículas com menores diâmetros) e de baixo índice de plasticidade, indicado na Tabela 6.1. Como tal, não foi possível estimar os parâmetros de erodibilidade por fuga concentrada para esta amostra.



(a)



(b)



(c)

Figura 34 - Ensaio HET do solo B: (a) acumulação do material erodido e turbidez da água no reservatório de jusante; (b) acumulação do material erodido na câmara de jusante; (c) erosão na zona superior do provete por colapso do furo, pormenor do disco de geotêxtil.

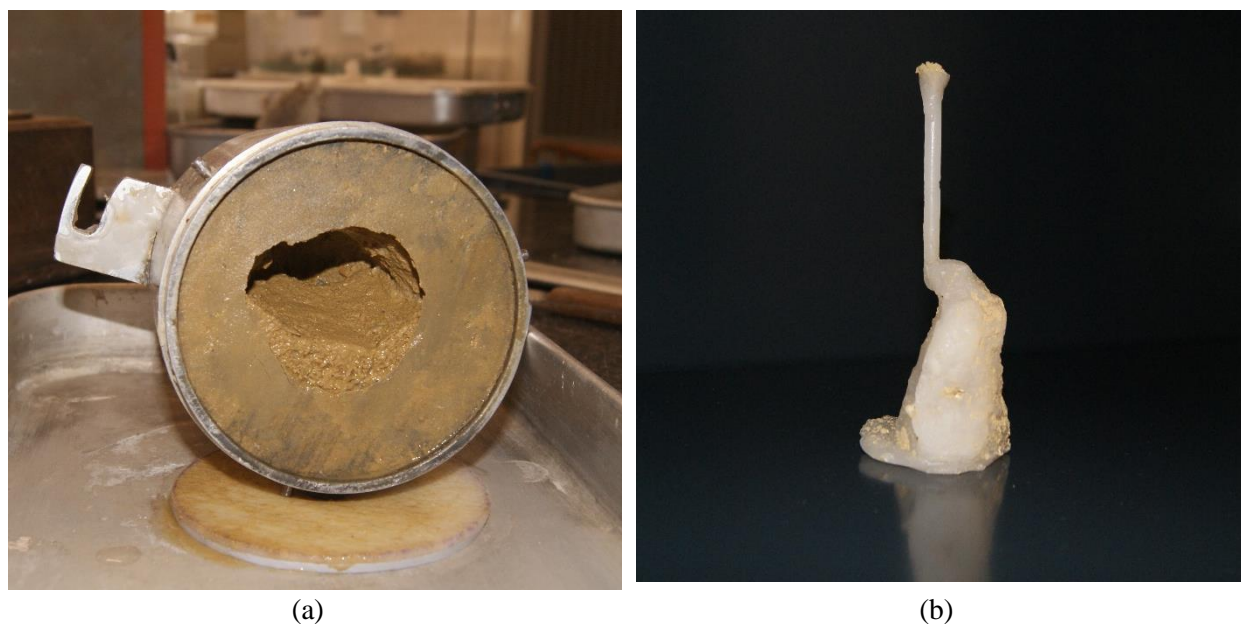


Figura 35 - Resultado de um ensaio do solo B: (a) erosão do provete no lado jusante; (b) molde de parafina, que permite observar a tendência do solo erodir de forma regressiva.

6.4.2. Solo C

Relativamente ao solo C (argila gorda), foram realizados cinco ensaios, dos quais somente três bem sucedidos. Na Tabela 6.5 resumem-se as condições de preparação destes três provetes, os quais foram preparados com o teor em água ótimo do ensaio Proctor e com número de pancadas (energia de compactação diversa). A diferentes energias de compactação correspondem valores de compacidade (graus de compactação, GC) e a pesos volúmicos secos (γ_d) distintos.

Tabela 6.5 - Ensaio HET condições iniciais C.

Ensaio		Caraterísticas de compactação				Condições iniciais		
Material C								
Proвете	w_{opt} (%)	Δw_{opt} (%)	Nº de pancadas/ camada	γ_d (kN/m^3)	GC (%)	Δh (mm)	i (-)	D_i (mm)
1	26,3	0	25	14,7	100	503	4,8	6
2	26,3	0	22	14,0	95,5	312	3,0	6
3	26,3	0	20	13,7	92,8	312	3,0	6

A aplicação dos critérios de paragem mencionados na secção 4.5, nomeadamente, do critério nº 3, que invoca a observação/avaliação do diâmetro do furo durante o procedimento de ensaio, conduziu a durações diferentes para os ensaios. Na Tabela 6.6 são apresentadas as condições finais e os parâmetros de erodibilidade estimados pelo método de cálculo indicado na secção 4.7.

O provete 1, preparado com 25 pancadas, visando o grau de compactação de 100%, foi submetido a um gradiente de 4,8. O ensaio durou 75 minutos e foi verificado um alargamento do furo inferior a 10 mm.

A dedução do volume final do furo deste provete, assim como dos restantes, foi estimada através da determinação do volume do molde de parafina, pelo método da pesagem da água deslocada pela sua submersão, tal como indicado na secção 4.6.

O provete 2 foi compactado com 22 pancadas, e o provete 3 com 20 pancadas, que conduziram aos respetivos graus de compactação, de 96 e de 93%. Ambos foram submetidos a um gradiente de 3, inferior ao anterior, uma vez que com a redução do grau de compactação é expectável existir uma maior redução do material.

O molde de parafina do provete 3 revelou uma maior seção na metade de jusante, devido à perda de material nessa extremidade, explicável pela menor compacidade do solo. Os moldes de parafina dos provetes 1 e 2 revelam apenas algumas irregularidades, Figura 36.

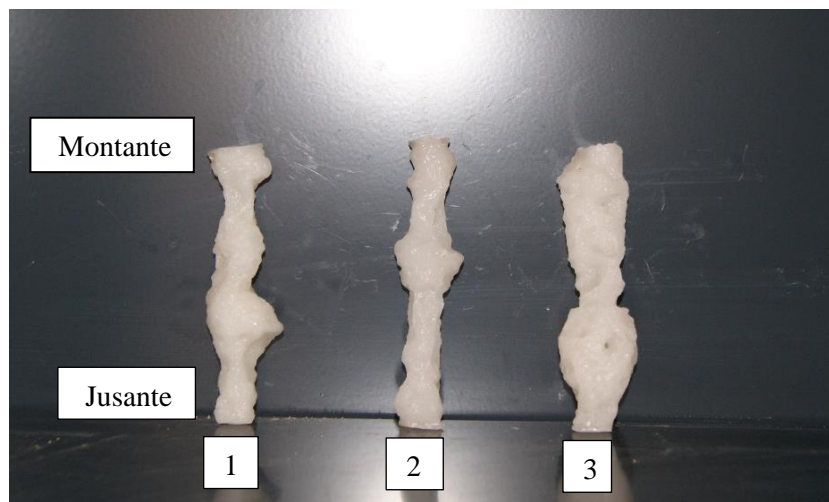


Figura 36 - Moldes de parafina referentes aos provetes 1, 2 e 3 do solo C, com a extremidade de montante para cima.

A irregularidade geométrica do molde de parafina (indicativo do volume final de erosão) será devida a duas causas. Uma relacionada com a progressão do processo de erosão e outra com a presença de contactos entre as camadas de compactação (transversais ao eixo do furo). O molde do ensaio 1 mostra um alargamento de jusante, sinal de heterogeneidade de compactação do provete, mais erodível em cerca de 2/3 do seu comprimento de jusante.

A maior duração do ensaio e o menor grau de compactação do provete 3 poderá explicar o maior volume (maior diâmetro equivalente) de erosão obtido, mesmo se comparado com o ensaio 1, com um gradiente inicial superior.

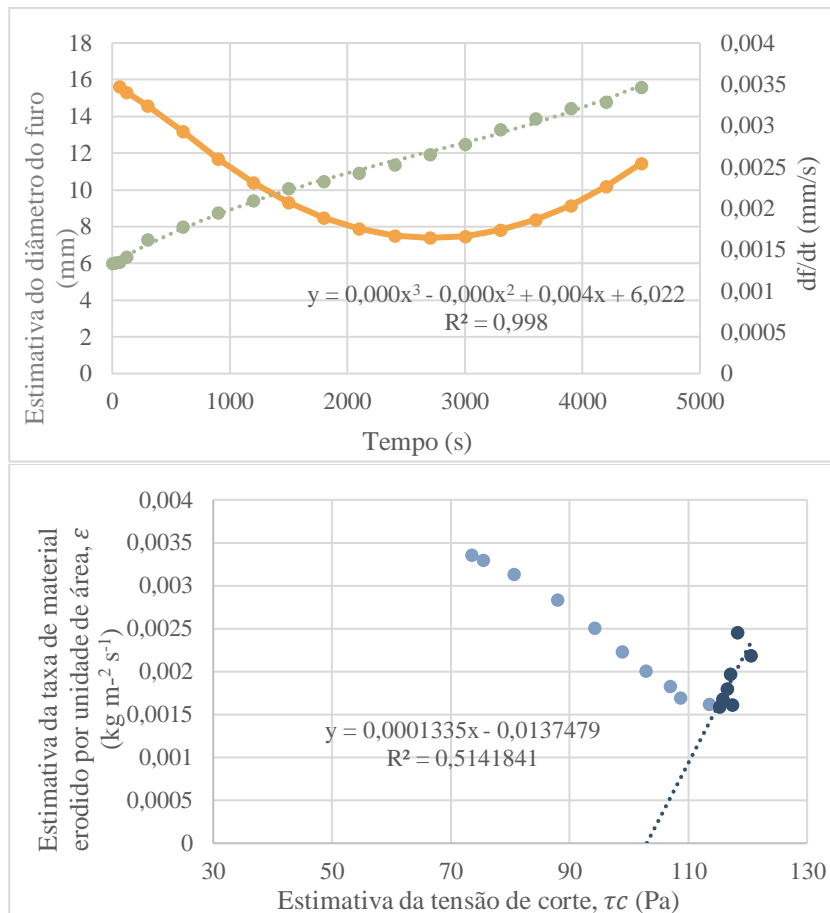
Nas Figuras 37, 38a, b, são apresentadas as equações que permitiram a estimativa a evolução do diâmetro do furo, e os parâmetros I_{HET} e τ_c para os três provetes. O declive da reta corresponde à taxa de erosão e a

interseção da reta com o eixo das abcissas a tensão de corte crítica, τ_c .

Através da análise de dados, comparando os três provetes, constata-se que o provete 1 apresentou maior resistência à erosão, uma vez que a tensão de corte crítica, τ_c ronda os 103,4 Pa e o I_{HET} 3,88. Quanto aos restantes provetes, o provete 3, com menor compactação, apresentou maior resistência que o provete 2. Tal pode ser explicado pela heterogeneidade da compactação dos provetes, com maiores erosões concentradas nas ligações entre as camadas.

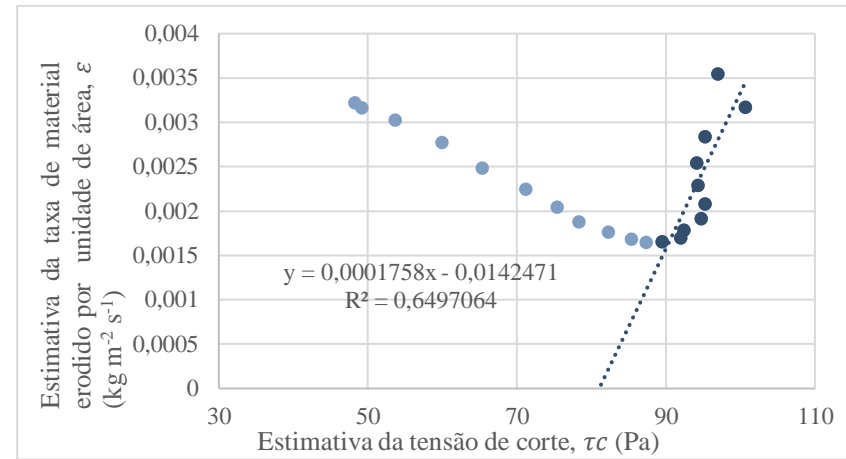
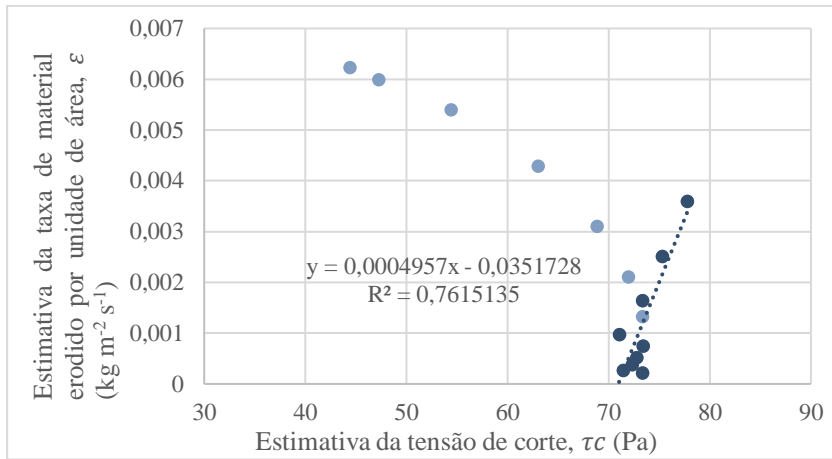
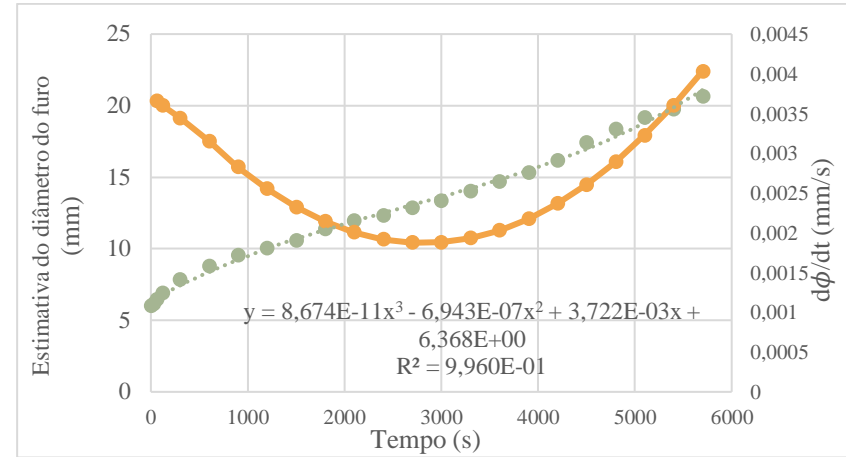
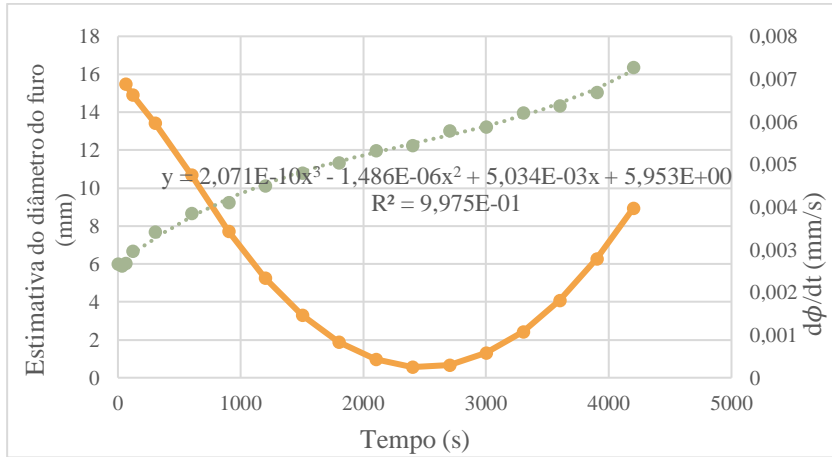
Tabela 6.6 - Ensaio HET condições finais e parâmetros de erodibilidade amostra C.

Ensaio Material C	Condições Finais		Parâmetros de erodibilidade	
Provete	D_f (mm)	t (min)	I_{HET} (-)	τ_c (Pa)
1	15,6	75	3,88	103,4
2	16,4	70	3,30	71,0
3	20,7	95	3,75	81,0



(a)

Figura 37 – Ensaio HET do solo C. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice de tensão de corte crítica, τ_c .



(a)

(b)

Figura 38 - Ensaio HET do solo C. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c , do solo C: (a) provete 2; (b) provete 3.

6.4.3. Solo D

Quanto ao solo D (caulino), o primeiro provete foi preparado com o teor de água ótimo determinado na caracterização inicial do material (30,7%). No entanto, o provete apresentou um padrão atípico de erosão. A tensão de corte manteve-se constante ao longo do ensaio e a taxa de erosão decresceu, como se pode observar graficamente na Figura 39. Este ensaio não permitiu a estimativa dos parâmetros de erodibilidade, mas levou à ponderação dos resultados obtidos no ensaio de Proctor normal.

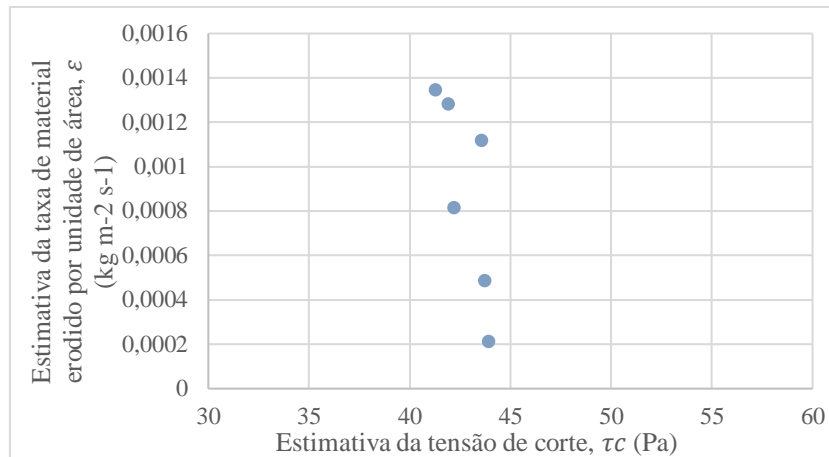


Figura 39 – Ensaio HET. Comportamento inesperado pela amostra D, do provete com comportamento atípico.

Como é habitual neste tipo de materiais, a curva de compactação apresenta uma extensa zona de pico. Não invalidando o ensaio realizado *a priori*, mas com base no ensaio HET, partindo do princípio de que o teor ótimo seria um pouco superior ao valor estabelecido inicialmente, de 30,7% (que corresponderia ao lado seco), procedeu-se a uma nova interpretação da curva de compactação com o intuito de definir com maior precisão o teor em água que realmente conduzia ao máximo peso volúmico seco do solo.

Paralelamente, ensaiou-se um provete, preparado equivocadamente com 36%, que veio a demonstrar a resistência tipicamente esperada por uma argila gorda preparada no lado húmido.

Convém acrescentar, que o manuseamento deste material após a mistura foi extremamente árduo e foram necessários vários dias para que a homogeneidade do provete fosse garantida.

Para analisar os parâmetros de erodibilidade do material D, definiu-se preparar mais dois provetes, um com o teor em água de 32%, e outro com 34%. As condições iniciais encontram-se na Tabela 6.7.

De acordo com os critérios de paragem mencionados na secção 4.5, foi possível submeter estes provetes a um período de ensaio superior comparativamente com os provetes do solo C. O ensaio do provete 2 deveria ter sido menos extenso, uma vez que o volume erodido é significativo, mas foi impossível durante o procedimento de ensaio detetar tal alargamento do canal na zona central (Figura 40). Os restantes moldes de parafina descrevem uma erosão uniforme ao longo do furo.

Tabela 6.7 - Ensaio HET condições iniciais dos provetes do solo D.

Ensaio Material D		Caraterísticas de compactação			Condições iniciais			
Provete	w_{opt} (%)	Δw_{opt} (%)	Nº de pancadas/ camada	γ_d (KN /m ³)	GC (%)	Δh (mm)	i (-)	D_i (mm)
1	32%	0	25	13,3	97,7	182	1,7	6
2	34%	+2	25	13,7	100	182	1,7	6
3	36%	+4	25	13,2	98,6	172	1,6	6



Figura 40 - Moldes de parafina referentes aos provetes do solo D, dispostos por ordem crescente de teor em água (32, 34 e 36%) da esquerda para direita e com a extremidade de montante para cima.

Durante a realização deste tipo de ensaios espera-se que o caudal aumente com o arrastamento de material. Porém, este material não teve um comportamento muito linear, Figura 41 e 42. Em alguns períodos verificou-se um relativo decréscimo do caudal, assim como algumas variações bruscas das alturas piezométricas, Figura 43. Em ensaios validos e capazes de ser interpretados da forma exposta anteriormente, verifica-se que a taxa de variação do diâmetro é inicialmente decrescente e, a partir de um determinado instante, crescente, o que indica que o processo de erosão se torna incontrollável e a erosão é capaz de arrastar de que modo crescente as partículas da parede do furo. Nos resultados apresentados nas Figuras 41 e 42, tal verifica-se nos provetes 2 e 3, pelo que os respectivos resultados são válidos.

No provete 1 a taxa de variação do diâmetro é sempre crescente, bem como a taxa de erosão do material, mesmo com o decréscimo da tensão de corte aplicada devido ao aumento do diâmetro. Deste modo, a interpretação do ensaio não permite avaliar a tensão de corte crítica neste provete. A taxa inicial do material erodido permite, no entanto, determinar o valor I_{HET} .

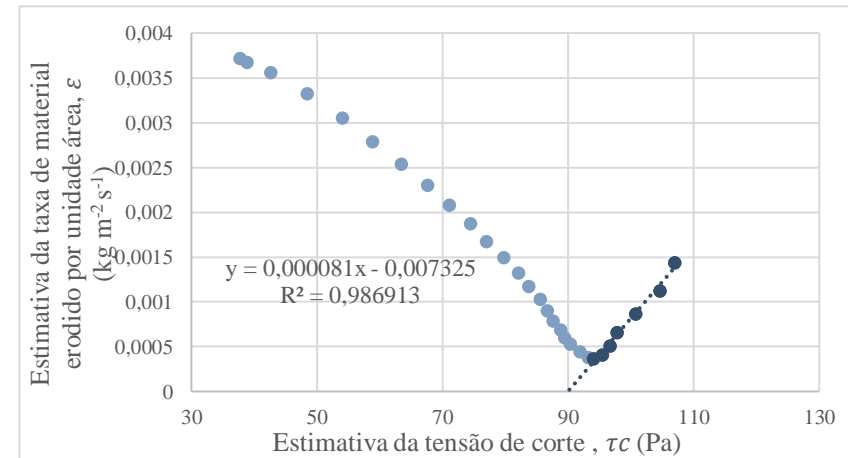
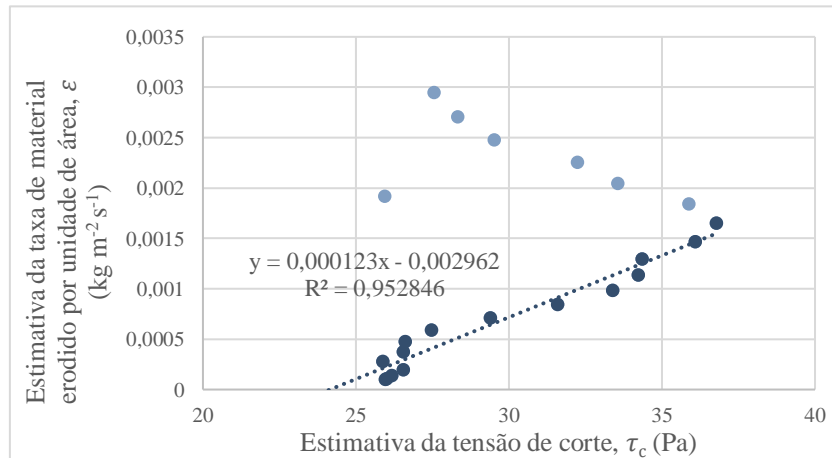
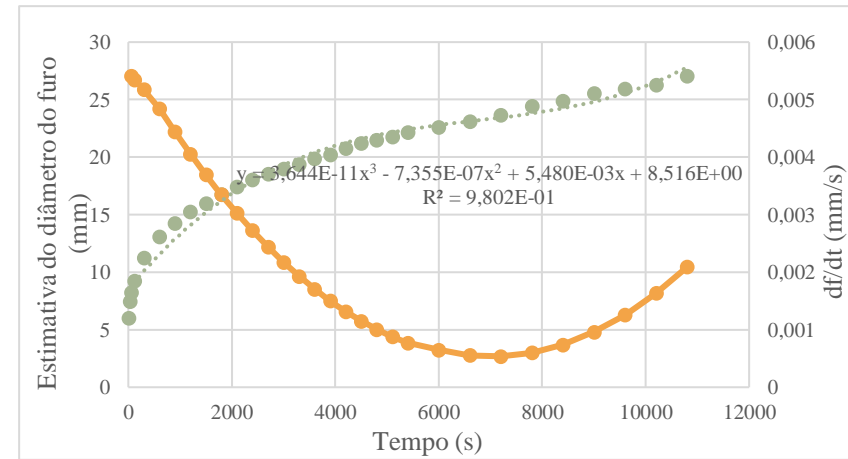
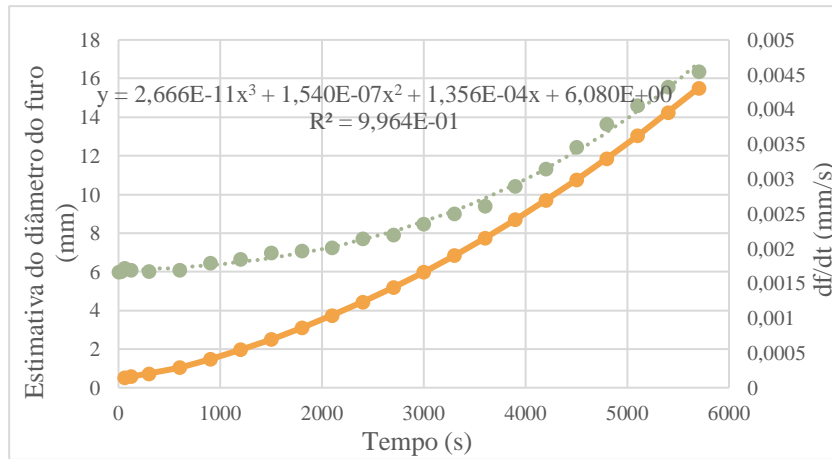


Figura 41 - Ensaio HET do solo D. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c : (a) provete 1; (b) provete 2.

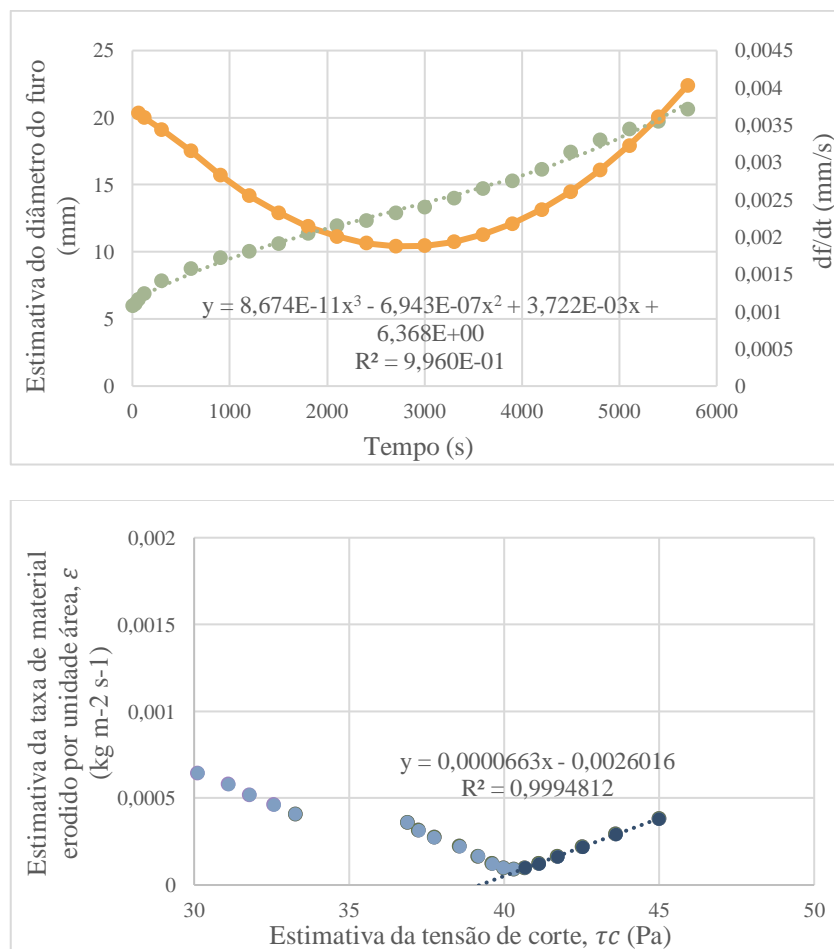


Figura 42 - Ensaio HET do solo D. Estimativa do diâmetro do furo, da taxa de erosão, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c , do provete 3.

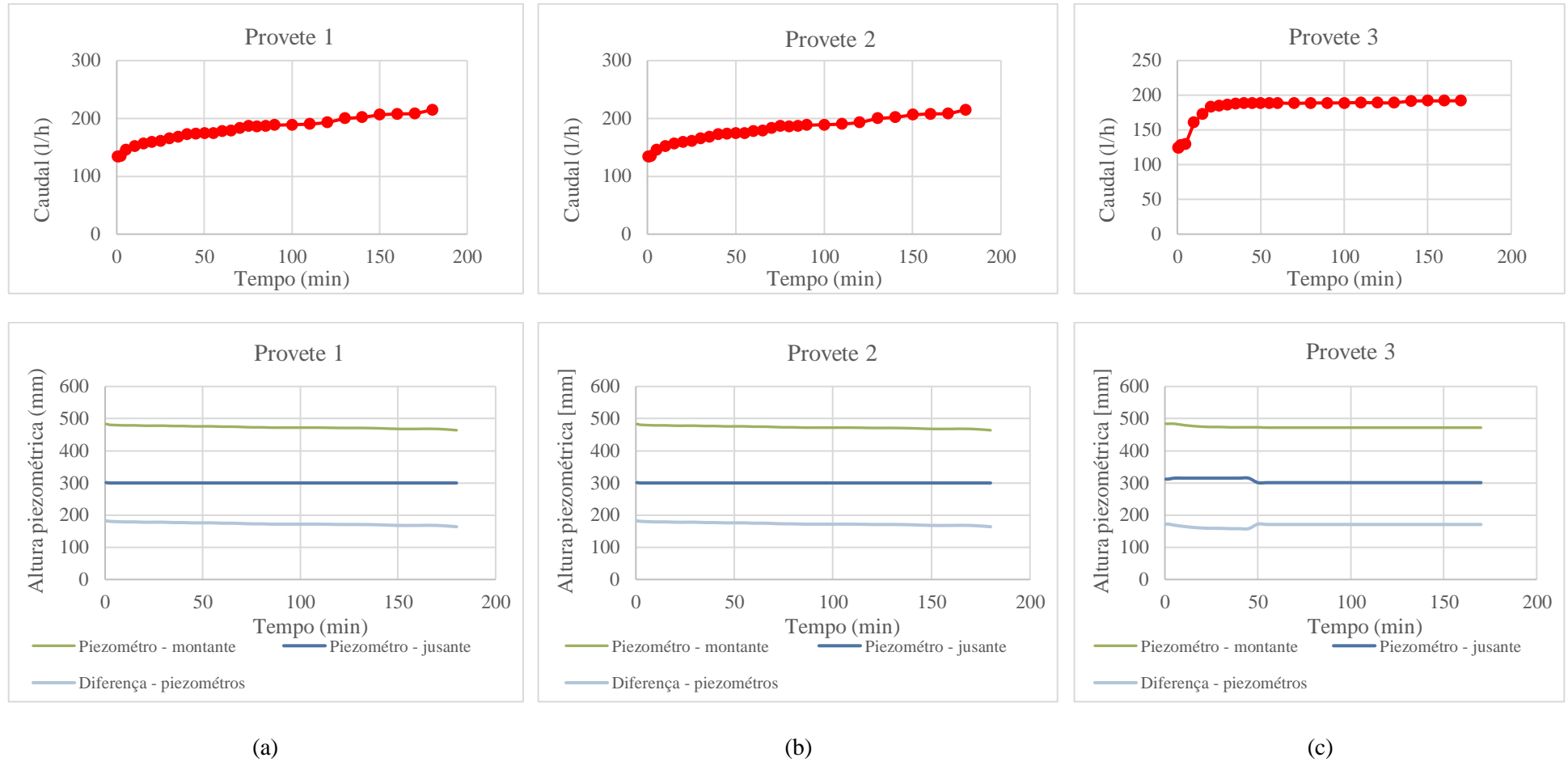


Figura 43 – Ensaio HET do solo D. Evolução do caudal e das alturas piezométricas em função do tempo: (a) provete 1; (b) provete 2; (c) provete 3.

Os resultados obtidos constam na Tabela 6.8, comprova-se que existe uma maior resistência à erosão para teores de água superiores ao ótimo (pelo menos para uma variação até + 4 %), sendo comum para este material, atingir uma tensão de corte crítica a rondar os 90 Pa. No entanto, o material do lado húmido (provetete 3) apresenta uma erosão mais lenta do que os restantes provetes (valores de I_{HET} superiores).

O provete 2, com o teor em água de 34%, apesar de revelar uma tensão de corte crítica mais elevada do que o provete 3, com 36%, apresentou um índice da taxa de erosão menor. O que significa que resistiu mais tempo ao fenómeno, mas quando se instalou a tensão de corte crítica, teve uma menor capacidade de resposta, verificando-se uma maior perda de material.

Tabela 6.8 - Ensaio HET condições finais e parâmetros de erodibilidade ao solo D.

Ensaio Material D	Condições Finais		Parâmetros de erodibilidade	
Provetete	D_f (mm)	t (min)	I_{HET} (-)	τ_c (Pa)
1	16,37	95	3,96	-
2	27,0	180	4,09	90,4
3	11,0	180	4,18	39,2

6.4.4. Solo A

As condições iniciais do ensaio HET realizado ao provete do solo A encontram-se definidas na Tabela 6.9. A amostra foi preparada com o teor de água ótimo e com um grau de compactação de 100%. O provete foi submetido a um gradiente de 2,4 por 180 minutos. No fim do ensaio, o molde de parafina permitiu estimar o diâmetro final, que conduziu à estimativa dos parâmetros de erodibilidade indicados na Tabela 6.10, (Amaral, 2017).

Tabela 6.9 - Ensaio HET condições iniciais do provete 1 do solo A.

Ensaio Material A	Caraterísticas de compactação				Condições iniciais			
Provetete	w_{opt} (%)	Δw_{opt} (%)	Nº de pancadas/ camada	γ_d (KN/m ³)	GC (%)	Δh (mm)	i (-)	D_i (mm)
1	10,3	0	25	19,9	100	285	2,5	6

Tabela 6.10 - Ensaio HET condições finais e parâmetros de erodibilidade ao solo A.

Ensaio	Material A	Condições Finais		Parâmetros de erodibilidade	
Proвете	D_f (mm)	t (min)	I_{HET} (-)	τ_c (Pa)	
1	9	180	4,00	36,7	

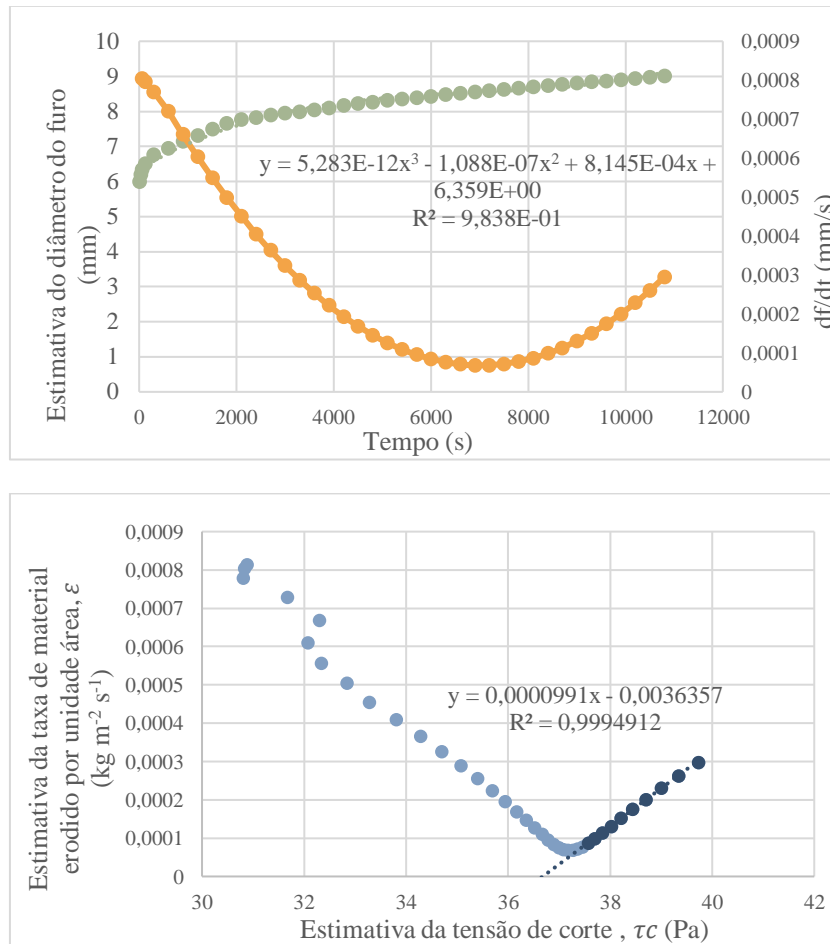


Figura 44 - Ensaio HET. Estimativa do diâmetro do furo, do índice da taxa de erosão, I_{HET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do solo A.

6.5. CET

6.5.1. Solo A

Como indicado na Tabela 5.1, foram realizados cinco ensaios com o solo A. Os provetes foram preparados com o teor em água ótimo e com o grau de compactação de 100%. Após a compactação reduziu-se a altura necessária do provete para a colocação das geomembranas. Para o processo de execução da fenda recorreu-se a uma espátula, de seção transversal de $1,3 \times 30 \text{ mm}^2$ (Figura 28(a)).

A espátula foi cravada facilmente no solo e criou-se uma secção razoavelmente uniforme ao longo do provete (Figura 45).



Figura 45 - Execução da fenda com a espátula no provete 1 do solo C: (a) penetração da espátula; (b) provete 1 do solo A após perfuração.

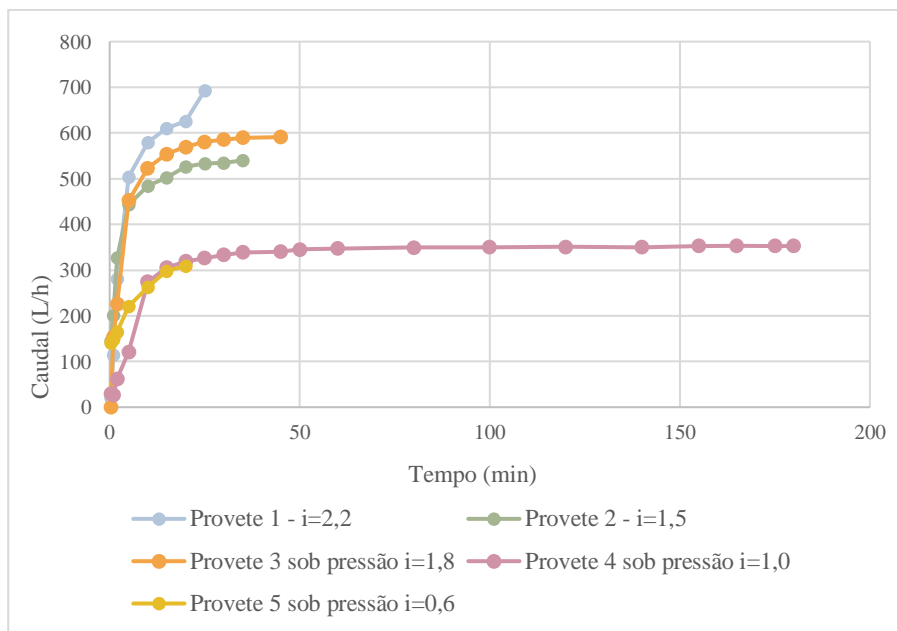
Para a realização destes ensaios fez-se variar a pressão na célula e o gradiente hidráulico. Os dois primeiros ensaios foram realizados com pressão mínima (cerca de 3kPa) e os restantes com uma pressão superior (4 a 7 kPa). Para criar este efeito de pressão na célula aumentou-se a altura do reservatório de jusante, h_J , e conseqüentemente, a altura do reservatório de montante, h_M , de forma a garantir o gradiente hidráulico desejado. Estas condições iniciais, assim como as características da compactação constam na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Ensaio CET condições iniciais dos provetes solo A.

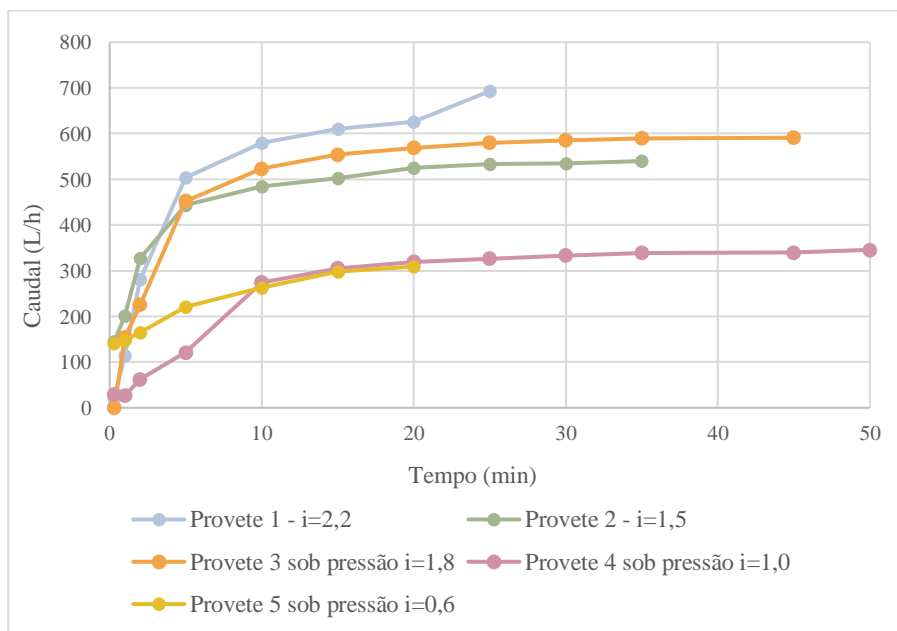
Ensaio		Caraterísticas de compactação				Condições iniciais				
Material A										
Provete	w_{opt} (%)	Δw_{opt} (%)	Nº de pancadas/ camada	γ_d (KN/m^3)	GC (%)	h_M (mm)	h_J (mm)	Δh (mm)	i (-)	e_i (mm)
1	10,3	0	25	19,9	100	534	305	229	2,2	1,3
2	10,3	0	25	19,9	100	464	306	158	1,5	1,3
3	10,3	0	25	19,9	100	608	421	187	1,8	1,3
4	10,3	0	25	19,9	100	813	706	107	1,0	1,3
5	10,3	0	25	19,9	100	800	733	67	0,6	1,3

Nos ensaios realizados com os provetes 1 e 2, observou-se que o caudal aumentava progressivamente até

um certo limiar, e que as alturas piezométricas tendiam a igualarem-se (Figura 46 e 47). Sendo este um dos critérios de paragem, ambos os ensaios tiveram uma duração relativamente reduzida. O provete 1, com um gradiente de 2,2 teve uma duração de 25 minutos, e o provete 2, com um gradiente de 1,5, teve uma duração de 35 minutos.

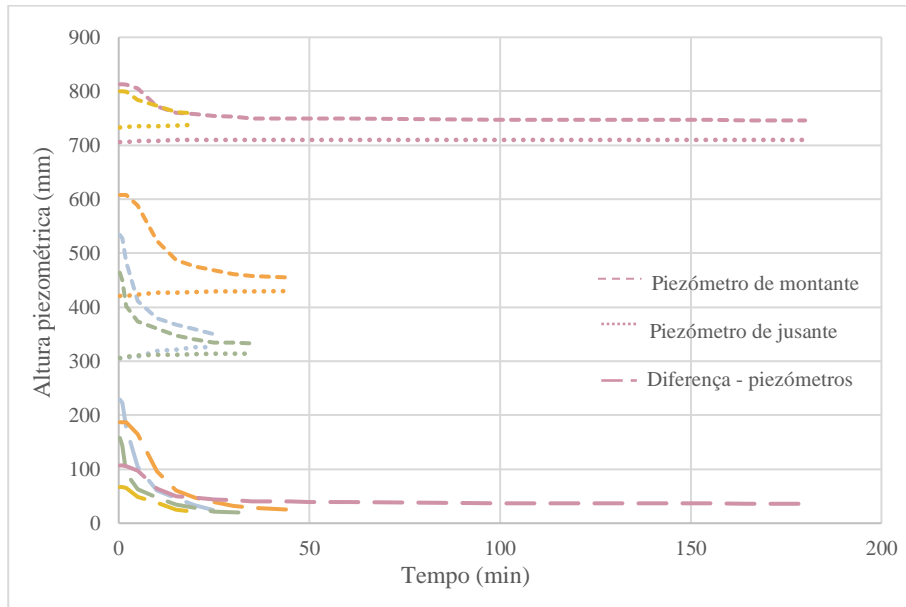


(a)

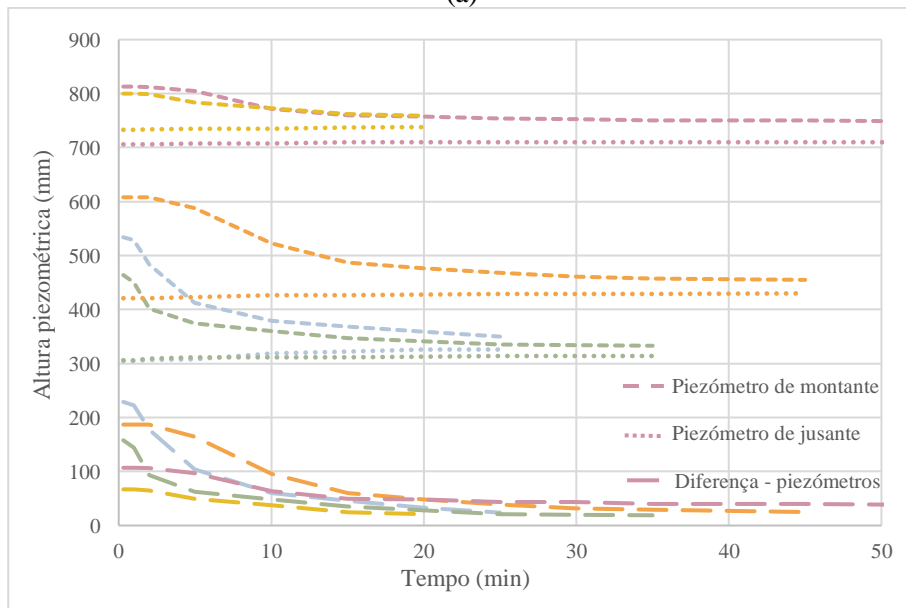


(b)

Figura 46 – Evolução do caudal no ensaio CET do solo A: (a) ao longo de todo o ensaio; (b) nos primeiros 50 minutos de ensaio.



(a)



(b)

Figura 47 - Evolução das alturas piezométricas no ensaio CET do solo A: (a) ao longo de todo o ensaio; (b) nos primeiros 50 minutos de ensaio.

Com o intuito de aumentar o tempo de ensaio e de manter maior período de tempo os gradientes hidráulicos, e dado que se trata de um solo mais permeável que os restantes solos analisados, no qual a água terá uma maior tendência a infiltrar-se sob pressão média, pensou-se em aumentar a pressão intersticial na célula de ensaio.

No ensaio ao provete 3, aumentou-se a altura do reservatório de jusante cerca de 116 mm de altura, passando a ter 421 mm, e colocou-se o de montante a 813 mm, ao que corresponde a um gradiente hidráulico de 1,8. Este procedimento manteve-se para os restantes provetes. No ensaio do provete 4, o reservatório de jusante aumentou para os 710 mm, e no ensaio ao provete 5, para os 733 mm de altura (altura contabilizada a partir

da base da célula de ensaio).

E, na verdade, os ensaios dos provetes 3 e 4 tiveram uma duração mais prolongada. No ensaio do provete 3 com um gradiente hidráulico de 1,8, ou seja, entre os gradientes estabelecidos para o provete 1 e 2, a duração foi de mais alguns minutos, mas no ensaio do provete 4 com um gradiente hidráulico de 1 o ensaio estendeu-se até às três horas. No ensaio realizado ao provete 5, apesar desta alteração, como o desnível entre os reservatórios era muito pequeno, o gradiente hidráulico pouco contribuiu para a erosão do solo, e a espessura da fenda apenas sofreu uma variação de 5 mm.

Com exceção do ensaio do provete 1, os caudais na fenda estabilizaram ao fim de 30 minutos (Figura 46 e 47), o que evidencia a capacidade de limitação do fluxo da fissura, conseqüente da diminuição do gradiente hidráulico. Chama-se à atenção que o caudal do provete 5 logo nos primeiros instantes apresentou valores mais elevados.

Deste modo, os parâmetros determinados nestes ensaios, não classificam este solo quanto à sua resistência à erosão interna, mas sim à sua capacidade de limitação do fluxo e interrupção deste fenómeno. Os moldes de parafina remetem para uma erosão interna bastante uniforme (Figura 48). Não apresentam um maior volume nas zonas mais suscetíveis, como na interface entre as camadas, nem foram visíveis perturbações vindas do processo de cravação. No geral, a erosão foi uniforme ao longo do canal, à exceção do provete 2, que perdeu mais material no extremo de jusante.

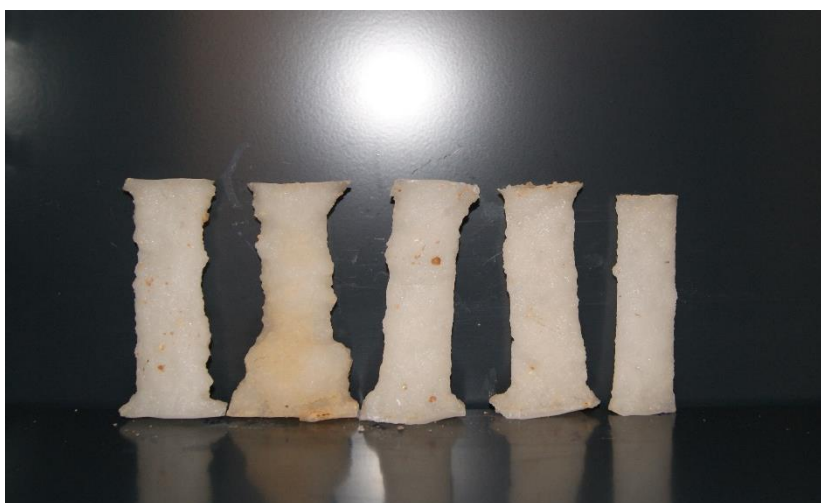


Figura 48 - Moldes de parafina dos provetes do solo A após ensaio CET.

Apesar de ter sido interessante analisar o efeito da sob pressão na célula de ensaio, e deste aspeto ter contribuído para alongar a duração dos ensaios dos provetes 4 e 5, acabou por não contrariar as tendências já diagnosticadas, nos provetes 1 e 2.

Recorrendo a uma função polinomial, de grau 4 para os provetes 1, 3 e 4 e de grau 6 para os provetes 2 e 5 (com o intuito da função se ajustar bem à evolução da espessura da fenda) definiu-se a relação entre a taxa de erosão e a tensão de corte. No entanto, a relação entre estes parâmetros não se assemelha à relação tipicamente esperada, uma vez que nestes ensaios o fenómeno que ocorreu foi de limitação do fluxo e de

interrupção do processo de erosão interna, contrariamente ao analisado nos ensaios HET, de progressão da erosão interna.

A relação entre ambos é distinta da convencional, porque se verifica que a tensão de corte assume um determinado valor, e depois tende a diminuir com a estabilização do caudal.

Deste modo, apenas foi possível estimar a tensão de corte máxima, τ_{max} , e o índice da taxa de erosão inicial, $I_{CET(i)}$ indicado na Tabela 6.12.

O índice da taxa de erosão inicial, permite de certo modo comparar a evolução do material erodido até ocorrer a limitação de fluxo. À semelhança da metodologia proposta, este índice foi determinado para valores de tensão de corte crescente. Para tal, fez-se passar uma reta tangente aos pontos correspondentes aos instantes, t , iniciais, e definiu-se o índice $I_{CET(i)}$ com base no logaritmo do declive $C_{L(i)}$.

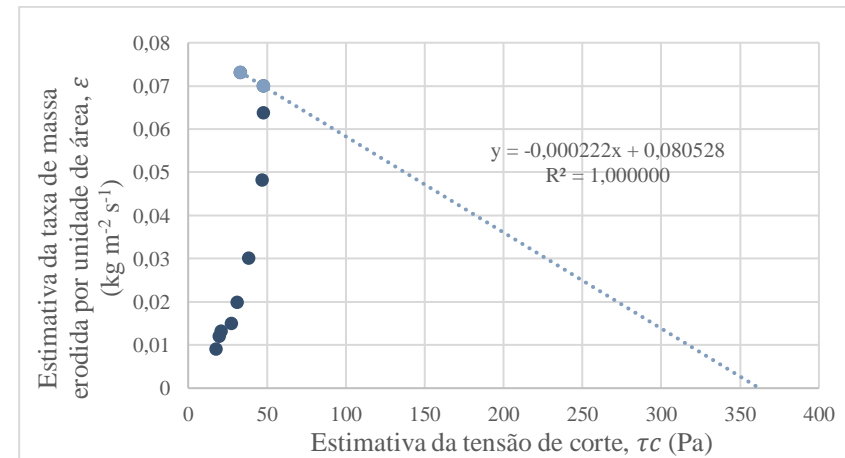
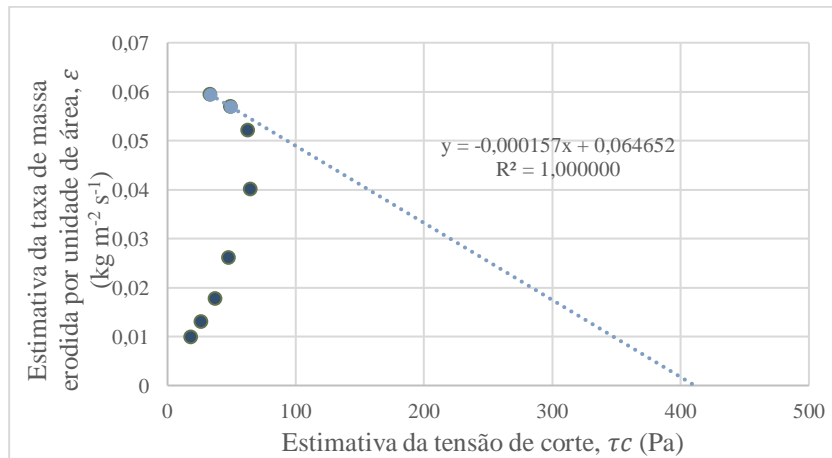
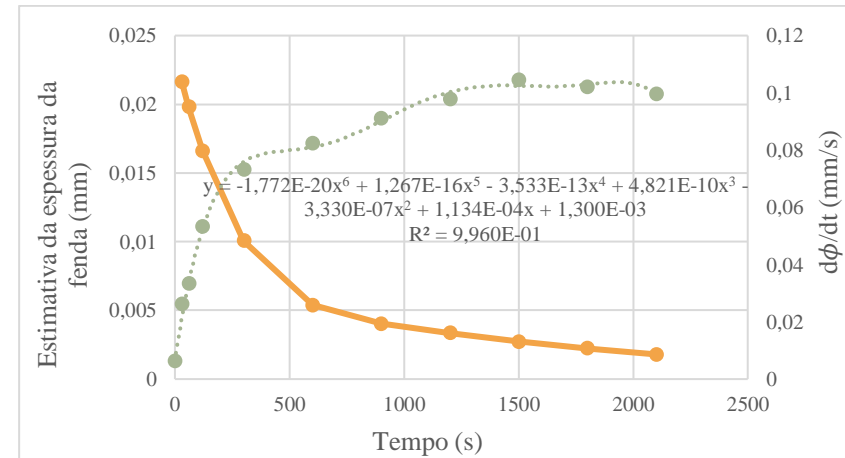
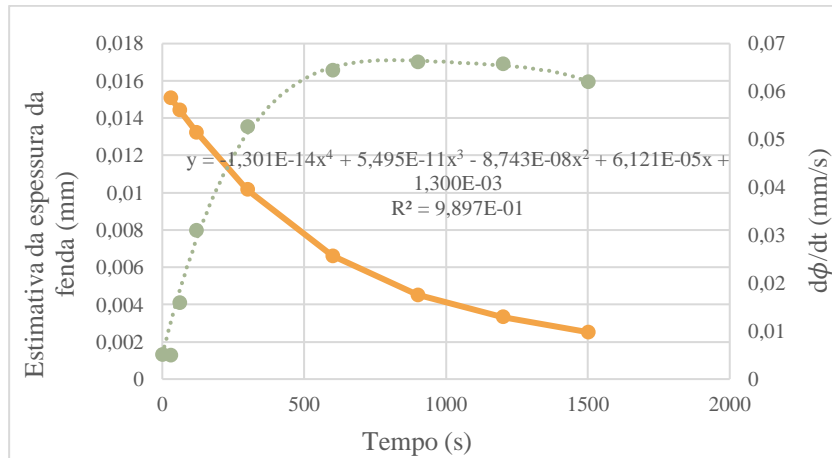
Relativamente aos provetes 1 e 2, o provete 1, com um gradiente hidráulico mais elevado, apresenta parâmetros de limitação de fluxo mais elevados. O $I_{CET(i)}$, de 3,80 demonstra que o provete 1, necessitou de mais tempo para atingir a tensão de corte máxima, de 64 Pa, e revela uma tensão de corte limite (maxima) mais superior à do provete 2, de 47 Pa.

Nos restantes provetes, em que se vez aumentar a pressão intersticial da célula de ensaio e diminuir o gradiente hidráulico, é notável o decréscimo da tensão de corte limite (devido à redução do gradiente hidráulico) assim como, a diminuição do índice da limitação do fluxo (devido ao aumento de pressão, que permitiu enaltecer a capacidade do solo restringir o fluxo num menor período de tempo).

Em suma, os cinco ensaios demonstram que para gradientes hidráulicos mais elevados, as tensões de corte limite são mais elevadas, e que o aumento da pressão intersticial permite atingi-las num menor período.

Tabela 6.12 – Ensaio CET condições finais e parâmetros de erodibilidade do solo A.

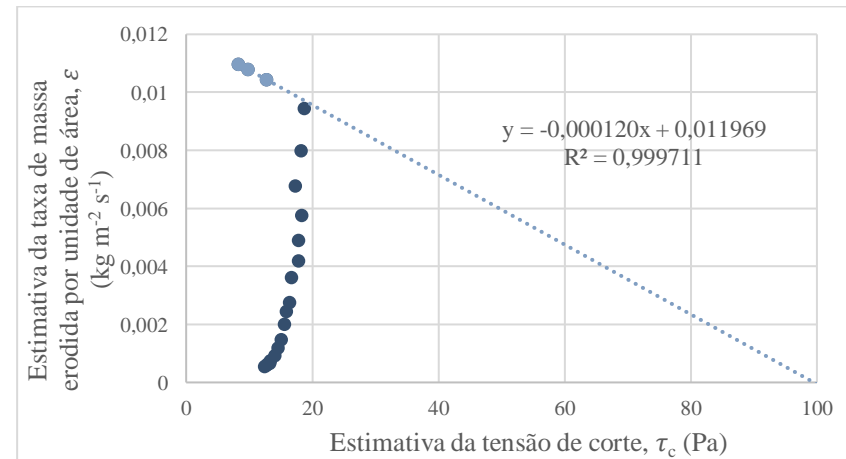
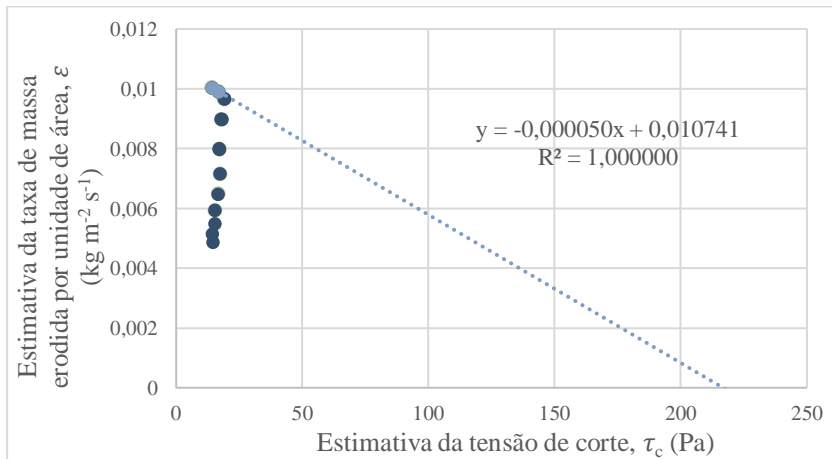
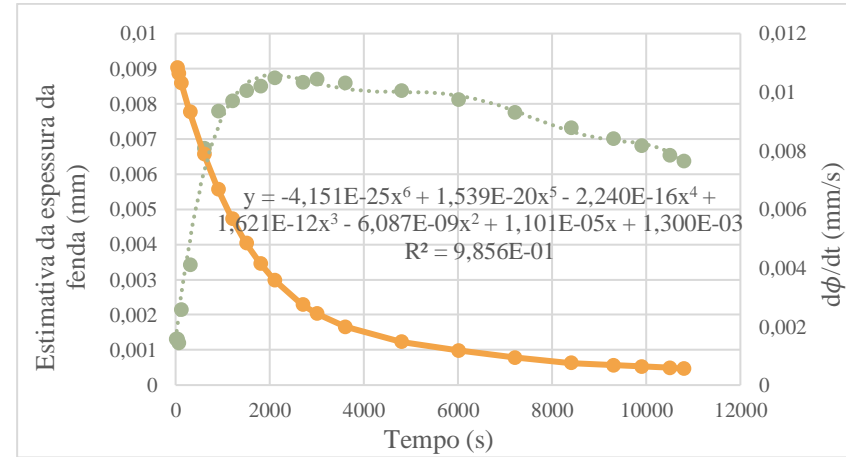
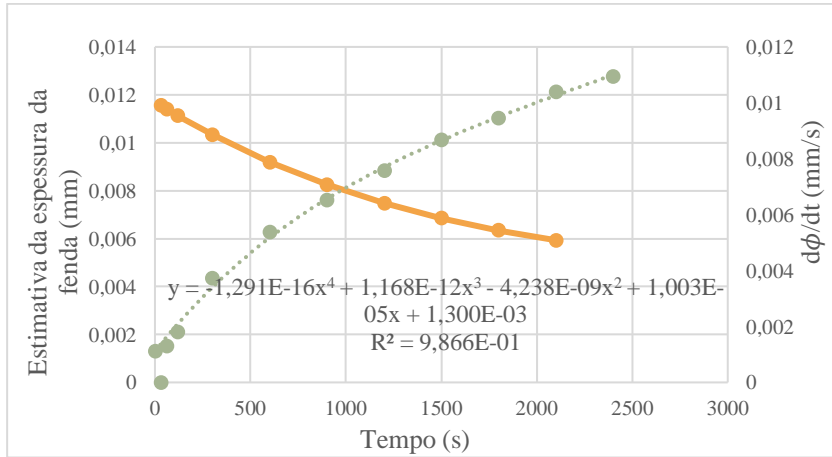
Ensaio Material A	Condições Finais		Parâmetros de limitação do fluxo	
	e_f (mm)	t (min)	$I_{CET(i)}$ (-)	τ_{max} (Pa)
1	15,6	25	3,80	64
2	20,7	35	3,65	47
3	16,4	40	4,30	19
4	8,93	180	3,92	19
5	6,38	15	2,55	16



(a)

(b)

Figura 49 - Ensaio CET do solo A. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c : (a) provete 1; (b) provete 2.



(c)

(d)

Figura 50 – Ensaio CET do solo A. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c : (c) provete 3; (d) provete 4.

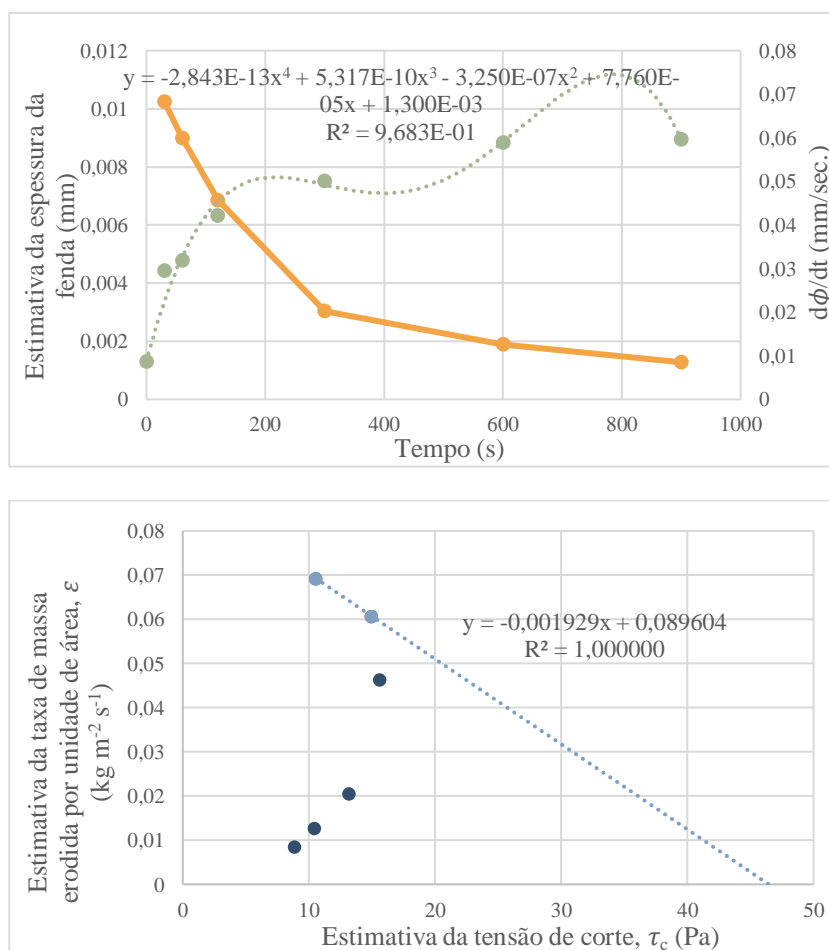


Figura 51 - Ensaio CET do solo A. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 5.

6.5.2. Solo C

Relativamente à argila C, tal como indicado na Tabela 5.1, este solo foi ensaiado um maior número de vezes. Esta situação não foi planeada, deveu-se ao facto dos primeiros ensaios CET terem sido realizados com este material, no decurso dos quais se experimentaram algumas técnicas, que contribuíram para aprimorar o processo de execução da fenda.

Para os dois primeiros ensaios realizados com o solo C, foram preparados dois provetes para as condições normais padrão (Proctor) e, para o processo de execução da fenda, recorreu-se novamente à espátula. Do ponto de vista técnico, a cravação da espátula na argila C não foi tão simples como na areia A, dada a dureza do material, e a dificuldade de garantir a verticalidade. Contudo a operação permitiu conferir a secção desejada ao longo do provete (Figura 52).

Para o primeiro ensaio, submeteu-se o provete 1, a um gradiente hidráulico de três, já anteriormente utilizado no ensaio HET deste material. As condições iniciais encontram-se na Tabela 6.13.

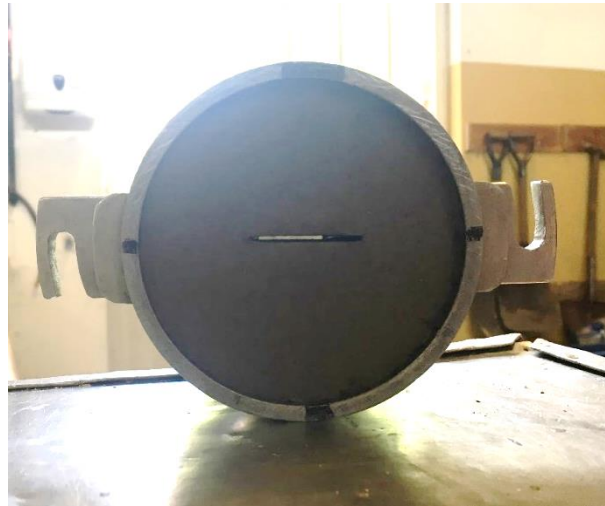


Figura 52 - provete 1 do solo C após a perfuração.

Tabela 6.13 - Ensaio CET condições iniciais para os provetes 1 e 2 do solo B.

Ensaio		Caraterísticas de compactação				Condições iniciais		
Material B								
Provete	w_{opt} (%)	Δw_{opt} (%)	Nº de pancadas /camada	γ_d (KN/m^3)	GC (%)	Δh (mm)	i (-)	e_i (mm)
1	26,3	0	25	14,7	100	317	3-5	1,3
2	26,3	0	22	14,7	100	364	3,5	1,3

Ao contrário do esperado, o caudal não tendeu a aumentar no início do ensaio. Nos primeiros vinte cinco minutos, o caudal reduziu-se de 91 l/h para 29 l/h (Figura 54). Era visível pela câmara de jusante que a secção da fenda tendia a fechar por expansão da argila.

Sem terminar o ensaio, decidiu-se altear o reservatório de montante (mais 200 mm), para impor um gradiente mais elevado (de 5) que pudesse contrariar esta situação, aumentando deste modo o pelo efeito erosivo. Esta manobra, permitiu reabrir a secção, e por conseguinte, aumentar o escoamento. O caudal começou a aumentar gradualmente e as pressões mantiveram-se constantes (Figuras 53 e 54). Ao fim de 90 minutos, devido à quantidade de material já coletado na câmara de jusante e ao abaixamento das alturas piezométricas, terminou-se o ensaio.

No segundo ensaio, utilizou-se um gradiente hidráulico mais elevado, de 3,5. Constatou-se, novamente, um decréscimo do caudal, nos primeiros 45 minutos, entre os 140 e os 37 l/h e um aumento deste nos 70 minutos seguintes, entre os 37 e os 679 l/h. Este efeito repercutiu novamente nas alturas de água dos piezómetros, e o ensaio voltou a terminar pelas mesmas razões.

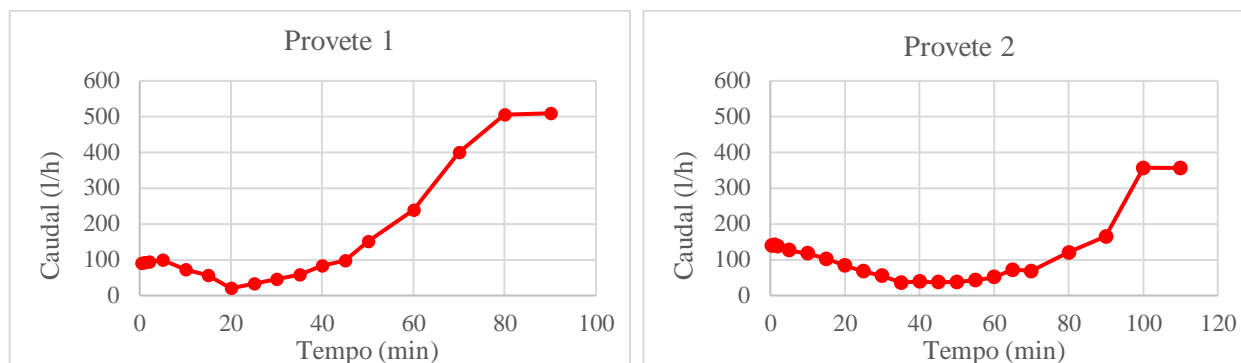


Figura 53 - Evolução do caudal em função do tempo nos ensaios dos provetes 1 e 2 do solo C.

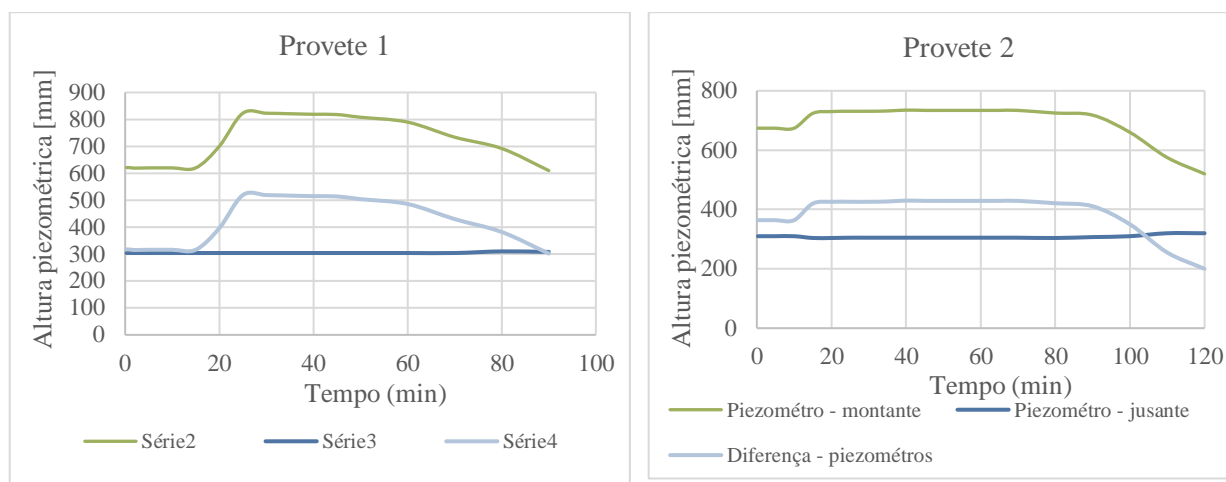


Figura 54 - Alturas piezométricas registadas nos ensaios realizados aos provetes 1 e 2 do solo C.

Os moldes de parafina dos provetes 1 e 2 (Figura 55), destacam maior erosão numa das laterais, que pode ser justificada com a inclinação da fenda na célula de ensaio.

A fraca precisão do método não permitiu que a fenda ficasse completamente centrada ao longo do eixo longitudinal do provete, e como tal, também não ficou centrada na célula de ensaio. Deste modo, na extremidade mais inclinada ocorre uma maior passagem de água e consequente maior erosão de material.



Figura 55 - Moldes de parafina, dos provetes 1 e 2 do solo C ensaio CET.

Recorrendo a funções polinomiais de quinto grau para estimar a evolução da espessura da fenda, foi possível estimar o índice da taxa de erosão e a tensão de corte crítica para os provetes (Figura 56 e Figura 57). Os

parâmetros estimados constam na Tabela 6.14.

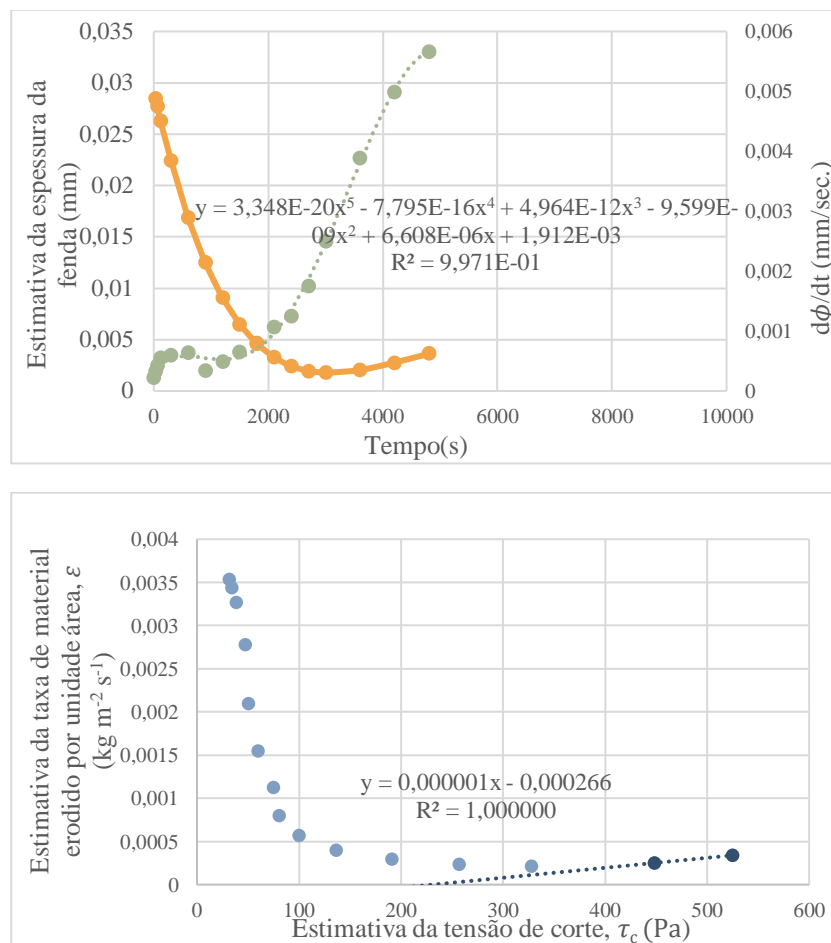


Figura 56 – Ensaio CET solo C. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 1.

Tabela 6.14 – Ensaio CET condições finais e parâmetros de erodibilidade do solo C

Ensaio Material C	Condições Finais		Parâmetros de erodibilidade	
	e_f (mm)	t (min)	I_{CET} (-)	τ_c (Pa)
1	31,9	90	6	266
2	33,0	120	4,8	149,7

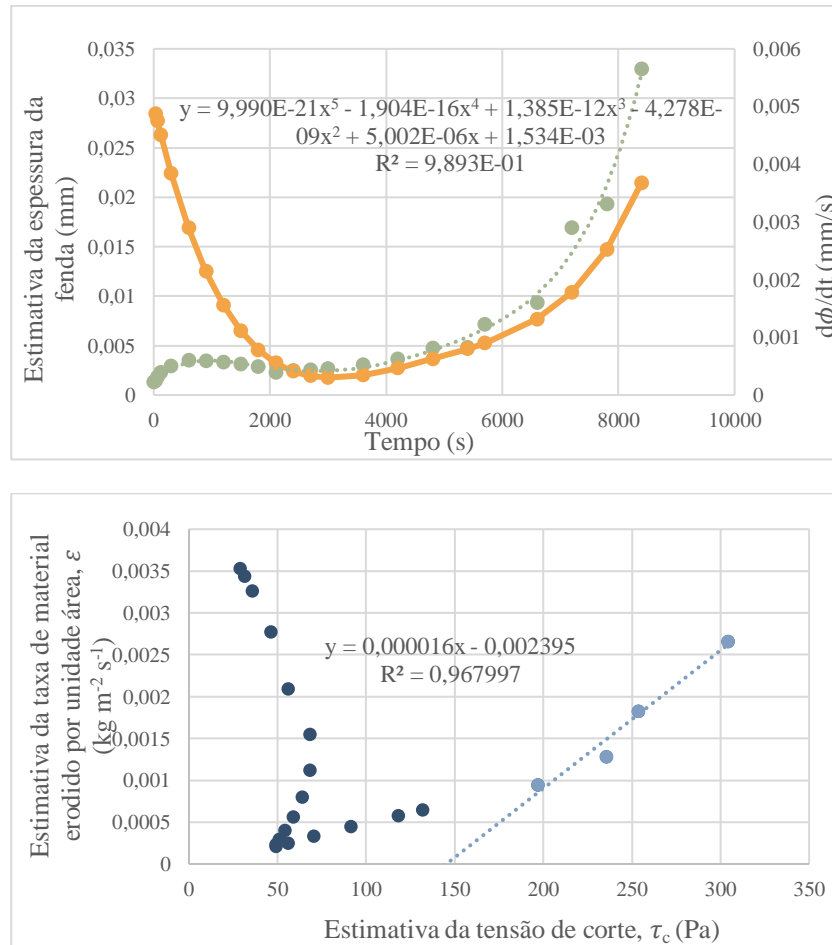


Figura 57 - Ensaio CET solo C. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 2.

Procedeu-se à preparação de mais três provetes, nas mesmas condições. Abandonando a espátula, recorreu-se a uma lâmina de maior secção, com a dimensão de $2 \times 60 \text{ mm}^2$, e cravou-se nos provetes manualmente. A penetração da lâmina nos provetes e a sua extração revelou-se um processo extremamente exigente e prolongado.

Dada a referência dos ensaios HET realizados, manteve-se o gradiente hidráulico de 3 para o ensaio dos provetes 3, 4 e 5.

No ensaio do provete 3 observou-se, novamente, o decréscimo do caudal nos primeiros cinquenta minutos de ensaio, e depois um aumento até aos cento e vinte minutos, tempo final do ensaio (o ensaio terminou aos 95 minutos, quando na câmara de jusante, se observou que parte da largura da fenda tinha sido ampliada, Figura 58). Para perceber esta inversão, no ensaio realizado com o provete 4, ao fim de meia hora, decidiu interromper-se o ensaio para observar o interior da fenda.

Desmontou-se a célula de ensaio, retirou-se o molde e tentou-se introduzir a parafina líquida. Todavia, dada a reduzida espessura da fenda, a parafina praticamente não penetrou na fenda, situação já identificada no provete 3.

Quando a parafina secou, foi necessário retirarem-se os provetes do molde com o extrator de amostras e

cortar-se os provetes em dois semicilindros para se observar o interior da fenda.

O resultado/geometria final da fenda foi muito similar nos três ensaios, como se pode observar na Figura 59. Observam-se superfícies lisas e destaca-se, apenas, uma maior erosão na zona de contacto entre as camadas no provete 3 e um caminho preferencial do escoamento à saída do provete 5, que talvez possa ser justificado pelo pior acabamento da fenda a jusante, devido ao processo de cravação e extração da lâmina.

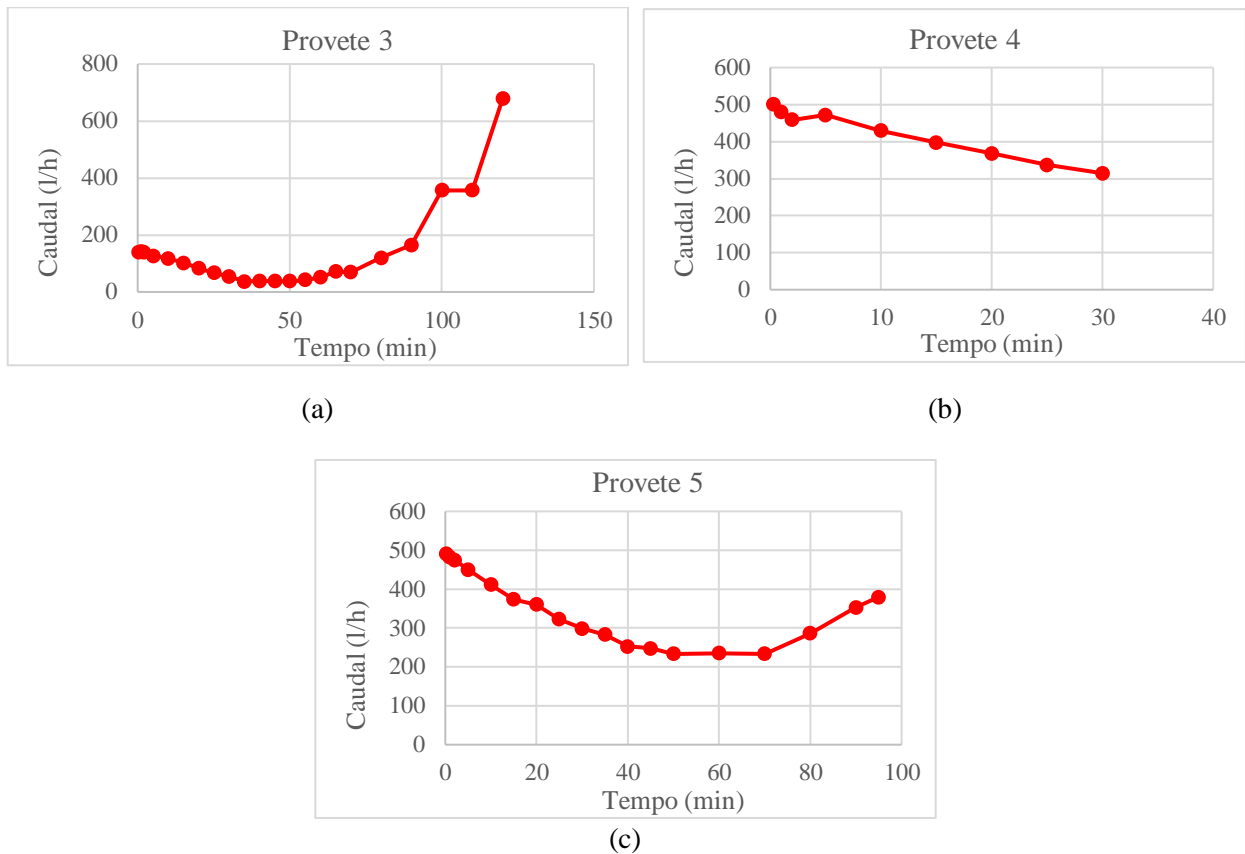


Figura 58 – Evolução do caudal no ensaio CET do solo C: (a) provete 3; (b) provete 4; (c) provete 5.



Figura 59 - Interior dos provetes 3, 4 e 5 após a realização do ensaio CET (dispostos pela respetiva ordem a partir da esquerda).

Em suma, os dois tipos de fenda executados com a espátula e a lâmina não permitiram a colmatação total da fenda em argila C. Numa primeira fase a expansão significativa do material contribuiu para a redução do escoamento, praticamente, ou seja, do arraste do material. Numa segunda fase, em que o processo de expansão terá terminado, ocorreu a prevalência do processo de erosão e o conseqüente alargamento da fenda.

Constatou-se uma maior erosão de material nos provetes 1 e 2 (espátula) do que nos provetes 3, 4 e 5 (lâmina), como se pode observar pelas Figuras 55 e 59. Nos provetes 3, 4 e 5, a erosão foi pouco significativa, devido à menor abertura inicial da fenda. No provete 3, o maior volume de parafina na extremidade de jusante deve-se ao uso de um martelo durante a cravação e, no provete 5, verificou-se que o escoamento se concentrou apenas numa das extremidades, possivelmente devido a defeito durante a execução da fenda inicial.

Uma vez que o fenómeno de expansão não foi verificado nos ensaios HET, questionou-se não só a geometria da fenda, como o adensamento induzido nas paredes da fenda no decurso do processo de cravação, uma vez que os provetes 3, 4 e 5 apresentavam superfícies bastante espelhadas.

Para contornar este efeito de adensamento, pensou-se em “esculpir-se” cautelosamente a fenda mediante a utilização de uma faca (técnica referida no capítulo 4, Figura 28(b)).

Para facilitar este processo, compactou-se o provete 6 (com somente 20 pancadas). No entanto, apesar de todo o esforço exigido pelo método, o ensaio voltou a ter o mesmo desfecho (Figura 60).

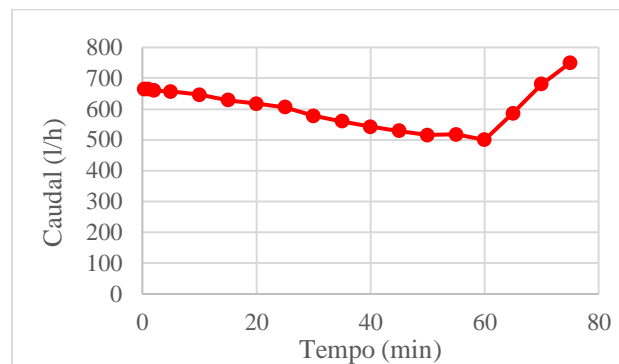


Figura 60 - Evolução do caudal no ensaio CET do solo C: provete 6.

Agravando a situação, em substituição das superfícies lisas, geraram-se irregularidades, onde se concentrou o processo de erosão, como se pode observar na Figura 61.

Esta técnica foi descartada e mais uma vez, com a intenção de atenuar o efeito do adensamento e alisamento nas superfícies, criou-se, um alinhamento de furos circulares, com um engenho de furação, que, tal como no ensaio HET, permitisse a remoção do material. Para este efeito utilizou-se uma broca de 5,5 mm e com o engenho de furação realizaram-se nove furos num provete preparado com o teor em água ótimo e um grau de compactação de 92% (20 pancadas). Colocou-se o molde no prato do engenho de furação, e perfurou-se o provete no sentido de montante – jusante, criando uma secção aproximadamente de 11x50 mm².



Figura 61 - Molde de parafina e superfícies irregulares do provete 6 do solo C após ensaio CET.



(a)

(b)

Figura 62 – Fenda do provete 7 do solo C: (a) face de jusante; (b) face de montante.

A operação foi menos demorada e permitiu efetuar a fenda ilustrada na Figura 62. Durante o ensaio, com um gradiente hidráulico bastante reduzido, o escoamento aumentou progressivamente e aos trinta e cinco minutos foi necessário interrompê-lo, quando atingiu os 963 l/h e as pressões a montante e a jusante tendiam a igualizar-se (Figura 63).

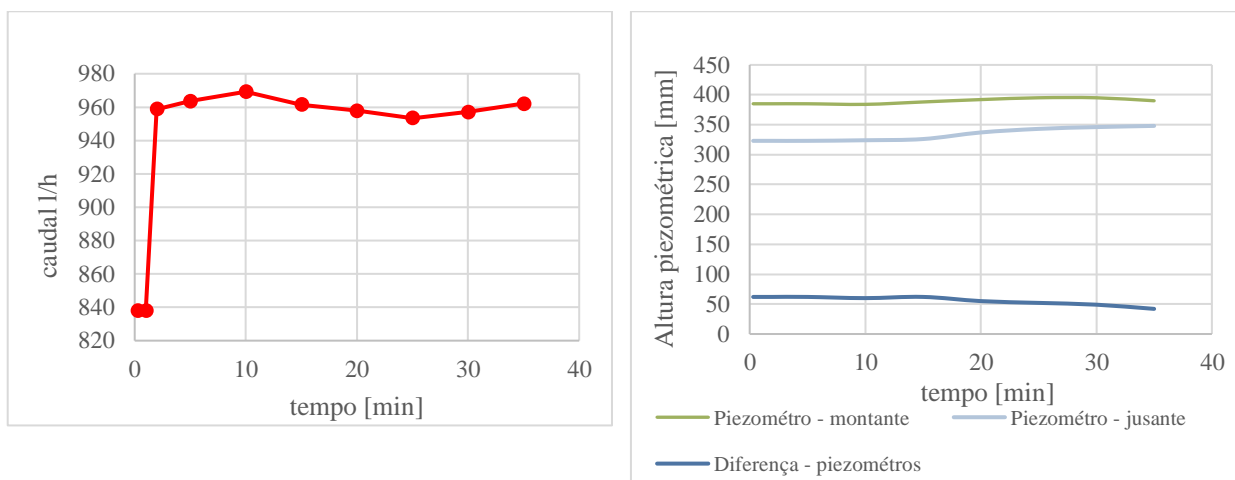


Figura 63 - Evolução do caudal e das alturas piezométricas no ensaio CET do provete 7 do solo C.

Ao observar o molde de parafina são notórias as irregularidades causadas, também, por este método de remoção, com as consequentes concentrações localizadas de erosão.

Na Figura 64, destacam-se as singularidades presentes nas faces e no extremo de jusante do molde de parafina. As singularidades nas faces são devidas ao conjunto das perfurações adjacentes. A singularidade a jusante é causada pela alteração da compactação e da estrutura do solo na zona da extremidade oposta ao sentido de furação, que, consequentemente e o solo desta zona acaba por ser levado pelo escoamento.



(a)

(b)

Figura 64 - Molde de parafina e superfícies interiores no ensaio CET do provete 7 do solo C: (a) superfícies irregulares; (b) extremo de jusante que sofreu maior erosão.

A deceção do emprego desta técnica, levou a rejeitar esta alternativa, e focou-se, novamente, no emprego de uma técnica de cravação. Desenhou-se um sistema, que garantisse a simplicidade do processo, quer a nível de tempo como de esforço técnico, a verticalidade da secção, que fosse reproduzível e que não compromettesse a zona oposta ao sentido da cravação. Produziu-se o sistema de cravação e extração da lâmina, mencionado no capítulo 4, e testou-se nos provetes 8 e 9, e ajustando alguns pormenores. Quando finalizado, estabeleceu-se realizar mais dois ensaios ao solo. Estes últimos ensaios ao solo C tinham como intuito comparar a erosão entre provetes compactados com diferentes energias. Como critério de paragem, definiu-se terminar o ensaio trinta minutos após a inversão do caudal. Para os provetes 10 e 11 foram selecionados os graus de compactação de 100% e de 95% (Tabela 6.14). Ambos foram preparados com o teor em água ótimo e submetidos a um gradiente hidráulico de 4.

Tabela 6.15 - Ensaio CET condições iniciais dos provetes 10 e 11 do solo C.

Ensaio		Caraterísticas de compactação definidas				Condições iniciais		
Material B								
Provete	w_{opt}	Δw_{opt}	Nº de pancadas/ camadas	γ_d	GC	Δh	i	e_i
	(%)	(%)		(KN/m^3)	(%)	(mm)	(-)	(mm)
10	26,3	0	25	14,6	100	415	4	2
11	26,3	0	22	13,9	95	415	4	2

No ensaio do provete 10, ao fim de noventa minutos, o caudal começou a aumentar e contabilizou-se mais trinta minutos de ensaio. Do mesmo modo, no ensaio do provete 11, ao fim de cento e vinte minutos, instante de inversão do caudal, foram contabilizados mais trinta minutos, (Figura 65).

A inversão do caudal ocorreu mais cedo no ensaio realizado com o provete 10, mas o provete 11 atingiu valores de caudal menores.

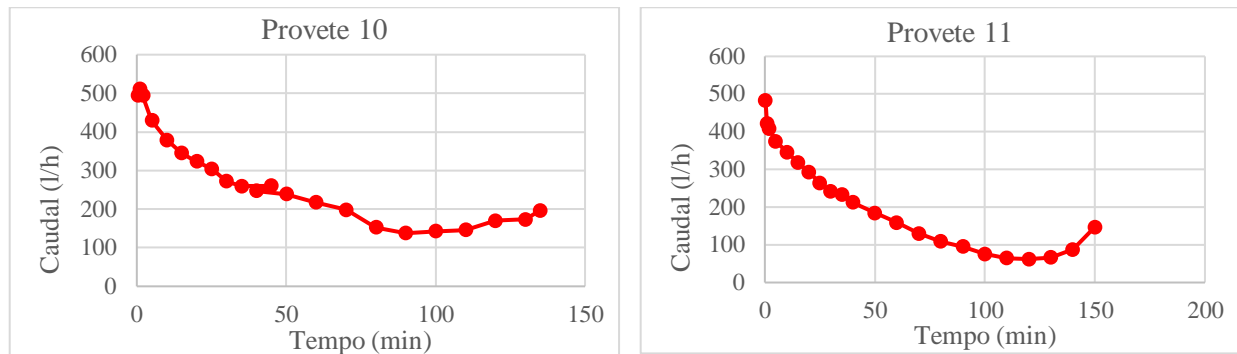


Figura 65 - Evolução do caudal ao longo do tempo no ensaio CET nos ensaios dos provetes 10 e 11 do solo C.

No fim do ensaio, colocou-se parafina líquida (bem quente para facilitar a penetração do fluido) e quando secou extraíram-se os provetes do molde. A Figura 66 ilustra o interior dos dois provetes e a área preenchida pela parafina. Observa-se uma erosão maior no provete 11, assim como um caminho preferencial entre as faces do provete. Por outro lado, observa-se que o escoamento no provete 10 fluiu em toda a secção, mas que ocorreu uma erosão mais acentuada na ligação entre as camadas.



(a)

(b)

Figura 66 - Moldes de parafina e o interior dos provetes do solo C: (a) provete 10; (b) provete 11.

Após a estimativa da espessura final equivalente pelo método da pesagem da água deslocada pela sua submersão, e com os registos obtidos no ensaio procedeu-se à determinação dos parâmetros de erodibilidade. Os ensaios realizados aos restantes provetes do solo C mostraram resultados afetados pelo efeito de

perfuração. Contudo, a resposta destes provetes adaptou-se à metodologia estabelecida, como se pode observar nas Figuras 67 e 68. As condições finais e os parâmetros de erodibilidade encontram-se na Tabela 6.16.

Os resultados indicam índices de erodibilidade da mesma ordem de grandeza, para as diferentes energias de compactação, após meia hora de erosão. No entanto, no provete com menor peso volúmico seco a fenda sofreu uma maior ampliação.

Tabela 6.16 - Ensaio CET condições finais e parâmetros de erodibilidade dos provetes 10 e 11 do solo C.

Ensaio Material C	Condições Finais		Parâmetros de erodibilidade	
Provete	e_f (mm)	t (min)	I_{CET} (-)	τ_c (Pa)
10	5,74	135	5,40	6,3
11	9,57	150	5,40	44,0

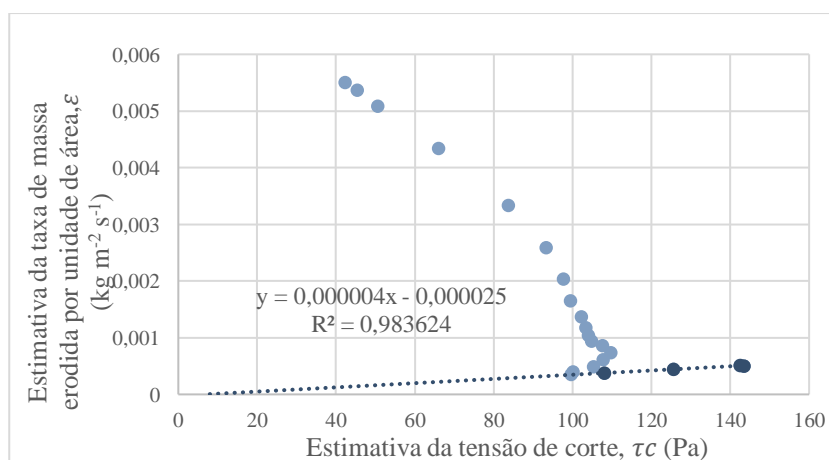
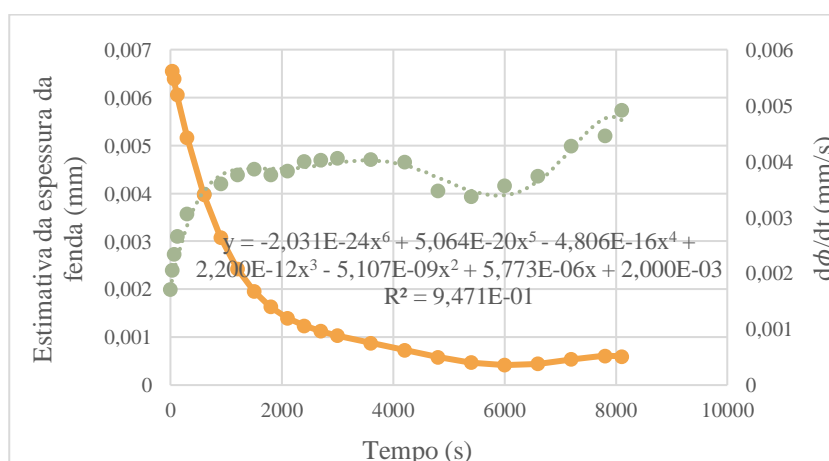


Figura 67 – Ensaio CET do solo C. Estimativa da espessura da fenda, I_{HET} , e do índice da taxa de tensão de corte crítica, τ_c , do provete 10.

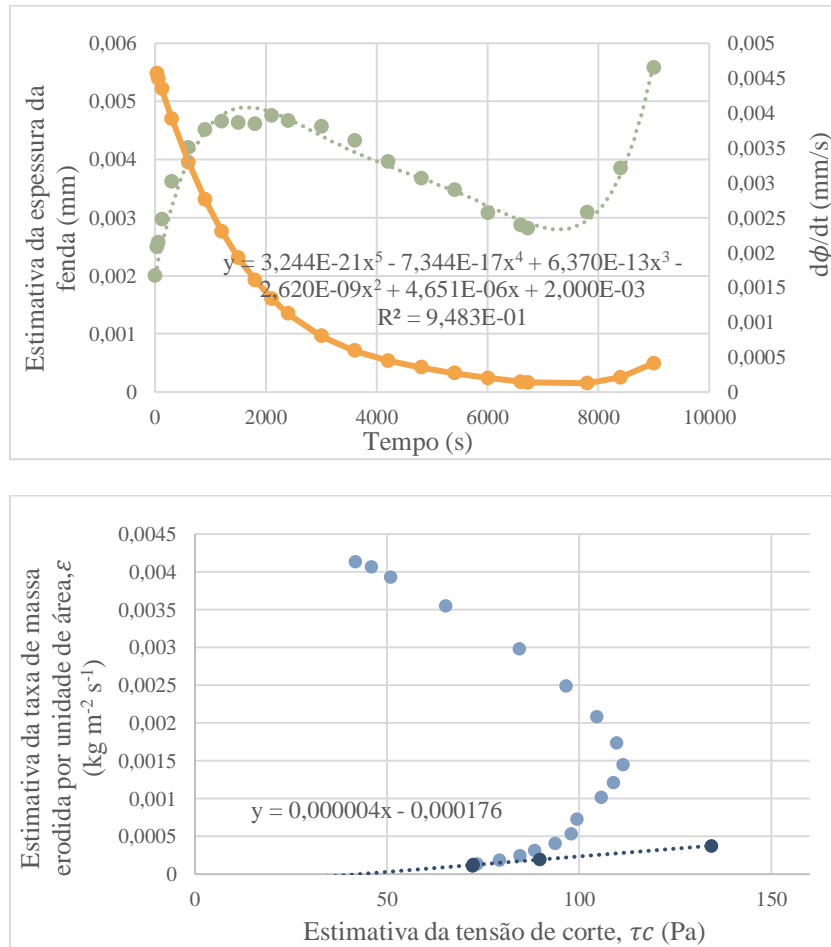


Figura 68 - Ensaio CET do solo C. Estimativa da espessura da fenda, do índice da taxa de erosão, I_{CET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , do provete 11.

6.5.3. Solo B

Para o silte B foi realizado apenas um ensaio CET, tal como indicado na Tabela 5.1. O solo foi preparado com o teor de água ótimo e compactado com vinte e cinco pancadas. Após a compactação, reduziu-se a altura do provete, para criar o espaço necessário no interior do molde para as duas geomembras com geotêxtil. Depois, sem as geomembranas (para não as danificar), o molde foi colocado na base do sistema de cravação e extração da lâmina, e perfurou-se o provete no sentido jusante-montante. O processo de perfuração foi simples, e dada a granulometria do solo, parte do material que ocupava a zona da fenda foi expulso pela face de montante. Apesar de ser desejável que parte desse material se desloque para o exterior (para não adensar em demasia as zonas vizinhas), o processo também fragilizou a extremidade de montante (Figura 69).

Dado o desfecho dos ensaios HET anteriormente realizados ao solo B, optou-se por submeter o provete a um gradiente hidráulico unitário, para limitar o desenvolvimento do desarranjo da estrutura do solo.

Iniciou-se o ensaio, e constatou-se um aumento brusco do caudal até aos dois minutos, onde se registou o valor de 906l/h tendo sido decidido terminar o ensaio com base no critério de paragem 2 estabelecido.



Figura 69 – Solo B compactado e perfurado, com desprendimento de material na extremidade de montante.

O molde de parafina ilustrado na Figura 70, evidência duas grandes irregularidades, nas extremidades de montante e de jusante. A de montante (base) deve ser desprezada, dado o estado inicial do provete. A da extremidade oposta é semelhante à já obtida no ensaio HET (Figura 35). É, portanto, visível que a erosão não ocorre regularmente ao longo da fenda. Tende a aumentar no sentido jusante – montante, o que permite concluir que o solo apresenta uma maior suscetibilidade à erosão regressiva do que à erosão tubular.

Tal significa que a geometria da fenda não influenciou o resultado final, e em ambos os ensaios a resposta do solo foi semelhante.

Importa, ainda, salientar que os ensaios HET realizados com solo B foram um pouco mais extensos (com uma duração entre 15 a 20 minutos), pelo que a erosão regressiva nos ensaios CET é mais rápida do que nos ensaios HET.



(a)



(b)

Figura 70 – Molde de parafina do provete da amostra B, disposto com a extremidade de jusante para cima.

6.5.4. Solo D

Os ensaios CET realizados com a amostra D permitiram concluir que esta secção possibilitou a colmatização total do material, ao contrário ensaio HET, que permitiu a erosão do material. Foram realizados três ensaios, nos quais, ao fim de 5 minutos, a fenda se fechou, interrompendo, assim, o fluxo. E apesar do sistema hidráulico permitir um desnível maior entre os reservatórios, decidiu-se não aumentar o gradiente hidráulico, uma vez que em situação real, não é comum uma barragem estar sujeita a gradientes hidráulicos tão elevados.

Para analisar o interior, os provetes foram extraídos do molde com o extrator de amostras, e cortados em dois semicilindros. Ao cortá-los a ligação entre as camadas de compactação foi claramente perceptível. E, evidentemente, não foi possível introduzir parafina líquida (Figura 71).



(a)



(b)



(c)

Figura 71 - Provetes do material D após o ensaio CET.

6.6. Discussão de resultados

Para sintetizar a influência da geometria da fenda nos ensaios HET e CET, segue-se uma breve discussão dos resultados obtidos.

Os solos A, C e D revelaram boa aderência aos ensaios HET, e permitiram a estimativa dos parâmetros de erodibilidade. Para a realização dos ensaios HET com os solos C e D, fez-se variar o gradiente hidráulico, e com o solo C, o grau de compactação, e com o solo D, o teor em água (-2% e +2%).

Para as condições ótimas do ensaio de Proctor, estimaram-se os parâmetros dos solos ensaiados que constam da Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Ensaios HET dos solos analisados. Preparados com o teor em água ótimo e compactação

Materiais	i (-)	I_{HET} (-)	τ_c (Pa)
A	2,5	14,6	36,7
B	-	-	-
C	4,8	3,88	103,4
D	1,7	4,09	90,4

Evidentemente, as argilas gordas apontam para tensões de corte críticas, e índices da taxa de erodibilidade mais elevados.

Nos ensaios realizados ao solo C, em que se fez variar o grau de compactação, sobressaltou a influência da heterogeneidade dos provetes. Apesar da compactação ter sido realizada tal como a norma indica, as interfaces entre as camadas proporcionaram zonas mais suscetíveis à erosão, que geraram erosões concentradas. Estas concentrações destacaram-se nos provetes com menor compactação.

Nos ensaios realizados ao solo D, a variação de mais 2 % do teor de água, levou a um índice mais elevado, o que indica um processo mais lento até atingir a tensão de corte crítica. No entanto, a erosão interna ocorre para uma tensão de corte mais baixa, comparativamente com o provete preparado com o teor em água ótimo.

Quanto ao solo B, não foi possível estimar os parâmetros de erodibilidade, uma vez que o solo não erodiu ao longo do orifício, e demonstrou erodir de forma regressiva (erosão que este ensaio não permite avaliar).

Com os ensaios CET realizados, apenas foi possível determinar os parâmetros de erodibilidade para o solo C. O processo de preparação desenvolvido com o intuito de simular a fenda, acabou por prejudicar a compactação dos provetes, influenciando o processo de erosão interna. E, como tal, foi difícil avaliar a resistência dos solos a este fenómeno. No entanto, também é notável que este processo acabou por afetar mais as argilas gordas (solos C e D) do que os solos mais arenosos (A e B), dado que, durante o processo

que cravação, nas argilas gordas o método promoveu o adensamento das paredes interiores, e no caso dos solos mais arenosos este efeito de adensamento foi insignificante, e promoveu a remoção de parte do material em excesso.

O material A, nos ensaios HET, mostrou erodir de forma tubular, ou seja, ao longo do procedimento de ensaio, verificou-se em ganho de resistência por parte do solo, e foi possível estimar a tensão de corte crítica, τ_c . Em contrapartida, nos ensaios CET, o comportamento do solo não foi similar. A tensão de corte foi crescente até determinado instante, e depois tendeu a diminuir. Nesse determinado instante, verifica-se uma tensão de corte máxima, τ_{max} , que delimita o processo de erosão, com o processo de abrandamento da mesma. Após esse instante, o solo revelou conseguir controlar o fluxo e travar o processo de erosão. Para interpretar este fenómeno foram definidos parâmetros para referenciar o processo de limitação do fluxo.

Este fenómeno, pode estar evidentemente relacionado com a geometria da fenda. A geometria circular gera um efeito de arco e contribuir para uma maior estabilidade do material, mas prolonga a sua erosão. Enquanto que, a fenda retangular, de menor abertura, induz tensões de corte inferiores, pelo que nestes ensaios permitiu a limitação de fluxo.

O solo B não se ajusta aos ensaios em causa, no sentido em que não possui a capacidade de erodir ao longo de uma fuga concentrada e erode de forma regressiva.

Relativamente ao solo C, verificou-se que, nos ensaios HET, o solo erodiu ao longo de todo o procedimento experimental, enquanto que, nos ensaios CET, numa primeira fase, o material teve tendência para expandir e só numa segunda fase erodiu. Este comportamento não se deve certamente somente à geometria atribuída à fenda, mas sim aos processos de cravação, que alteraram o estado de adensamento no solo circundante. Para ambos os processos de cravação experimentados, os índices de erodibilidade estimados classificam a erosão como moderada a extremamente lenta. No entanto, as tensões de corte críticas, pelo método de cravação – lâmina apresentam valores relativamente baixos para este material, o que sugere novamente a influência da geometria da fenda, uma vez que a lâmina confere uma secção maior que a espátula, Tabela 6.18.

Tabela 6.18 - Ensaio CET do solo C. Parâmetros de erodibilidade estimados, influência do método de cravação.

Provet	Metodo de cravação	<i>i</i> (—)	<i>I</i>_{HET} (—)	τ_c (<i>Pa</i>)
1	Espátula	3 - 5	6,00	266
2		3,5	4,80	149,7
10	Lâmina	4	5,40	6,3
11		4	5,40	44

Este facto, conduziu a índices da taxa de erodibilidade mais elevados, e a tensões de corte críticas menores comparativamente com os resultados obtidos nos ensaios HET. No entanto, estes índices da taxa de erosão mais elevados, são os índices esperados para este material (índices associados a uma erosão lenta).

Para o material D foram estimados os parâmetros de resistência à erosão interna pelo ensaio HET, mas nos ensaios CET, tal não foi possível, dada a excessiva expansão do material, que a conduziu ao fecho total da fenda.

Em suma, nos ensaios CET, o processo de simulação da fenda (cravação da lâmina) tornou mais evidente os efeitos de expansão dos solos C e D, não evidenciado nos ensaios HET. No caso do solo C, a expansão atrasou o processo de erosão interna, e no caso do solo D, a expansão levou à restrição total do fluxo, e à consequente colmatação da fenda, que impossibilitou a estimativa dos parâmetros de erodibilidade do solo D e condicionou os valores estimados para o solo C. No caso do solo A, para a nova geometria da fenda pode-se constatar a sua capacidade de limitação do fluxo.

7. Conclusão

7.1. Considerações finais

Para a realização do presente trabalho, em primeiro lugar, foi necessário elaborar uma breve revisão da bibliografia já existente, no âmbito da erosão interna em barragens de aterro. O trabalho procurou salientar a importância do estudo deste fenómeno, assim como o descrever quando ocorre por meio de uma fuga concentrada. Com fim a minimizar a ocorrência de incidentes, mencionaram-se alguns aspetos que devem ser avaliados e destacaram-se alguns dos ensaios laboratoriais, cruciais para a adequada utilização dos materiais neste tipo de estruturas.

Posteriormente, com o intuito de explorar uma crítica elaborada a um dos ensaios mencionados, ao ensaio HET, procedeu-se a um estudo experimental. A crítica debruça-se sobre a questão da geometria circular atribuída à fenda nos ensaios, e o estudo experimental visou analisar a influência da mesma. Para tal, procurou-se simular uma fenda com uma geometria mais representativa. Neste sentido, desenvolveu-se o ensaio CET, que à semelhança do ensaio de erosão de fissuras desenvolvido por Maranhã das Neves (1991), propôs criar uma fenda de secção retangular. No entanto, no ensaio aqui desenvolvido a percolação ocorre pelo interior do provete, num meio uniforme, e permite testar a capacidade de autossustentação do material, bem como determinar a sua erodibilidade.

O estudo experimental envolveu quatro solos de diferentes e contrastantes características granulométricas e de plasticidade, e contemplou a caracterização física dos mesmos, e a realização de ensaios HET e ensaios CET. Para a realização dos ensaios CET, com base na metodologia de cálculo definida no capítulo 4 para a estimativa dos parâmetros de erodibilidade nos ensaios HET, foi necessário estabelecer um conjunto de equações aplicáveis na interpretação deste novo tipo de ensaio, assim como desenvolver e aprimorar técnicas de execução e de avaliação do comportamento dos solos face a esta nova secção.

Para a simulação da fenda no provete de ensaio foram aplicadas quatro diferentes técnicas. A primeira consistiu na cravação manual de uma espátula, de muito difícil execução em solos argilosos devidamente compactados. Na segunda técnica substitui-se a espátula por uma lâmina de maior rigidez (com maior espessura e maior largura) e desenvolveu-se um sistema de cravação e extração mecânica, que permitiu garantir uma maior facilidade de execução, assegurando a verticalidade, e uma maior reprodutibilidade da secção da fenda ao longo do comprimento do provete e em provetes de diferentes tipos de solos. No entanto, estas técnicas materializavam a secção pretendida empurrando lateralmente o solo, pelo que produziam paredes das fendas com um adensamento superior ao do restante provete e com superfícies espelhadas, dificultando assim o processo de erosão. Para minimizar estes efeitos tentou-se extrair o solo localizado na zona da fenda, com uma técnica de remoção mediante a utilização de engenho de furação vertical (terceira

técnica) ou mediante o recurso a uma faca (quarta técnica). Estas técnicas causaram irregularidades várias que interferiram de forma significativa com os resultados dos ensaios, contribuindo para uma maior erosão nessas zonas, pelo que apenas as duas primeiras foram usadas na realização dos ensaios válidos.

Os resultados obtidos permitiram constatar que as técnicas desenvolvidas para a execução da fenda alteraram localmente a compactação dos solos mais argilosos, e conseqüentemente a resistência à erosão. No entanto, para os materiais arenosos e siltosos, a técnica de cravação aplicada, apresentou facilidade de execução e pouca perturbação à compactação dos provetes.

A influência da geometria da fenda foi notável, e permitiu revelar comportamentos muito diferenciados entre os ensaios HET e CET para as argilas gordas (materiais C e D) e para a areia silto-argilosa. Apenas para o silte arenoso o comportamento foi idêntico, revelando que este material é mais suscetível a fenómenos de erosão regressiva do que de erosão tubular.

Para a areia silto-argilosa, enquanto que a erosão progrediu nos ensaios HET, nos ensaios CET a erosão interna foi interrompida por limitação de fluxo, caracterizando-se na presente tese, este fenómeno através do índice da limitação do fluxo, definido a partir da taxa de erosão inicial da massa do solo, e a tensão de corte máxima previamente à estabilização do caudal (ocorrência do processo de limitação).

Nos ensaios CET do caulino (material D), contrariamente ao que ocorreu nos ensaios HET, a fenda fechou devido possivelmente a processos expansivos associados ao próprio material, a secção de diminuta abertura e ao processo de execução da mesma.

A metodologia de cálculo proposta para o ensaio CET, similar à do ensaio HET, permitiu a determinação dos parâmetros de erodibilidade dos solos que erodiram ao longo da fenda dos solos. Foram interpretados resultados de ensaios em fendas executadas através da cravação da espátula e recorrendo ao sistema de cravação e extração desenvolvido, os quais permitiram avaliar a sua influência nos parâmetros de erodibilidade obtidos. Apesar, das desvantagens associadas aos métodos de cravação, os parâmetros de erodibilidade estimados para o solo argiloso C, apresentaram índices de erodibilidade mais coerentes nos ensaios CET do que nos ensaios HET.

7.2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, seria de todo importante, melhorar o processo de execução da fenda desenvolvido, e estudar métodos capazes de minimizar as perturbações verificadas nas superfícies interiores, principalmente em casos de solos mais argilosos.

Seriam também relevante aprofundar a investigação em termos da aplicação de pressões de água mais significativas na célula de ensaio e estudar a direção das fendas, em especial, na direção vertical.

Sugere-se ainda, que sejam realizados mais ensaios CET, nos quais sejam analisados um maior número de tipos de solos. Esta questão seria essencial, para a definição de um comportamento tipicamente esperado por parte dos mesmos, que conseqüentemente, podia contribuir para uma revisão do comportamento dos

Estudo experimental com o ensaio HET da influência da geometria das fendas no desenvolvimento de erosão interna

solos fendilhados em face de um processo de erosão interna e uma adaptação mais rigorosa da metodologia de cálculo proposta.

Por último, este estudo deve ser alargado aos ensaios de limitação de fluxo (FLET) e de preenchimento de fissuras (CFET) pelos materiais localizados a montante de núcleos fissurados, considerando geometrias de secção rectangular e não circular na simulação das fendas.

Referências Bibliográficas

Amaral, S. (2017) Experimental characterization of the failure by overtopping of embankment dams. IST Press, dezembro de 2017 (374 pág.).

ASTM D4647-93 (1998) Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Solis by the Pinhole Test.

ASTM D2487-85 (1988) Unified Soil Classification System Test Procedures.

Bonelli, S.; Brivois, O.; Damien, L. (2007) The scaling law of piping erosion, Proceedings 18th Congress Français Mécanique, Grenoble.

Bui, H.; Fell, R. Song, C. (2004) Two and three dimensional numerical modeling of potential for cracking of embankment dams during construction, UNICIV R-426, The School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. Sydney, Australia.

Bui, H.; Fell, R. Song, C; Khalili, N. (2005) Two and three dimensional numerical modeling of potential for cracking of embankment dams-supplementary report UNICIV R-438, The School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. Sydney, Australia.

Caldeira, L. (2018) Internal erosion in dams, *Soils and Rocks*, 41, 3, 237–263.

Deer, W.; Howie, R.; Zussman, J. (2010) *Minerais Constituintes das Rochas*, F. Calouste, 4, 600-670.

Fell, R.; Foster, M.A. (1999). A Framework for Estimating the Probability of Failure of Embankment Dams by Piping Using Event Tree Methods, UNICIV Report No. R-377, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. Sydney, Australia.

Fell, R; Wan, C.F.; Foster M.A. (2007) Assessment of the likelihood of initiation of erosion in embankment dams, *Internal Erosion of Dams and their Foundations*, Editors R Fell and J-J Fry, London, 71-102.

Fell, R.; Foster, M., Cyganiewicz, J.; Sills, G., Vroman, N.; Davidson, R. (2008) A unified method for estimation probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping, UNICIV R 446, The University of New South Wales, URS, and US Army Corps of Engineers.

Hanson, G.J. (1990) Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II, developing an insitu device, *Transaction of the ASAE*, 33, 132-137.

Hanson, G.J. (1991) Development of Jet Index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways, *Transaction of the ASAE*, 34, 2015-2020.

Hanson, G.J; Cook, K.R. (2004) Apparatus, test procedures and analytical methods to measure soil erodibility in situ, *Applied Engineering in Agriculture*, 20, 455-462.

ICOLD, (2016) *Internal Erosion of Existing Dams, Levees And Dikes, And Their Foundations*, Bulletin

164, International Commission on Large Dams, Paris.

Kovács, G. (1981) Seepage hydraulics, Elsevier Scient, Amsterdam, Netherlands.

Lawrence (2002) Summary of outcomes of Workshop on cracking of homogeneous earth dams in semi-arid environments, Maricopa County, USA.

Lim, S.S. (2006) Experimental investigation of erosion variably saturated clay soils, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South South Wales, Sydney, Australia.

Lim, S. S.; Khalili (2010) Laboratory measurement of erosion of clay soils using rotating cylinder test. Geotechnical Testing Journal, Vol.32, No 3.

LNEC (1966) Especificação E 195 – 1966, Solos - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1966) Especificação E 196-1966, Solos – Análise granulométrica, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC (1966) Especificação E 197-1966, Solos - Ensaio de Compactação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Maranha das Neves, E (1991) Comportamento de barragens de terra-enrocamento, PhD, Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL, Lisboa, Portugal.

NP (1969) Norma Portuguesa NP – 143, Solos - Determinação dos limites de consistência, Lisboa.

NP (1965) Norma Portuguesa NP - 83, Solos - Determinação da densidade das partículas, Lisboa.

NP (1965) Norma Portuguesa NP - 84, Solos - Determinação do teor em água, Lisboa.

Santos, R.; Caldeira, L; Maranhã das Neves, E. (2010) Influência da energia de compactação na erodibilidade de um solo sujeito a uma fuga concentrada, Engenharia Geotecnia para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade,1-8.

Santos, R (2014) Experimental Investigation on Limitation of the Progression of Internal Erosion in Zoned Dams; Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Santos, R.; Caldeira, L.; Maranhã das Neves, E. (2016) Factors Limiting the Progression of Internal Erosion in Zoned Dams: Flow Limiting by an Upstream Material, J. Geotech. Geoenvironmental Eng.,143.

Sherard (1973) Embankment Dam Engineering Ed Hirschfield and Poulos, John Wiley and Sons.

Talbott, J. R (1994) The mechanics of cracking in embankment dams, Fracture Mechanics applied to Geotechnical Engineering, ASCE, 118-130.

USBR, (1979) Laboratory procedures for determining the dispersibility of clayey soils, REC-ERC-79-10, US Bureau of Reclamation, Denver.

USBR, (2015) Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations Key Concepts, US Bureau of Reclamation, Denver, 1–134.

Wan, C.F (2006) Experimental investigation of piping erosion and suffusion of soils in embankment dams and their foundation, PhD thesis School of civil environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.

Wan, C. F; Fell, R. (2002) Investigation of internal erosion and piping of Slot Erosion Test and Hole Erosion Test, Report UNICIV R-412, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South South Wales, Sydney, Australia.

Wan, C. F; Fell, R. (2004a) Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. ASCE Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering, 130, 4, 373-380.

Wan, C. F; Fell, R. (2004b) Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams. Geotechnical Testing Journal, 27, 3, 295-303.

White, F.M. (1998) Fluid Mecanics, McGraw-Hill College.

Von Thun, J.L. (1996) ASDSO Western Regional Conference: Understanding seepage and piping failures -dam safety problema in the west, Lake Tahoe, Nevada.

Website:

[W1] <https://www.icold-cigb.org/>, 06/19.

