

INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO PARCIALMENTE SATURADO SUJEITO A UMA FUGA CONCENTRADA

Influence of compaction in the erodability of a partially saturated soil
due to a concentrated leak

Ricardo Neves Correia dos Santos*

Laura Maria Mello Saraiva Caldeira**

Emanuel Maranha das Neves***

RESUMO – Neste artigo é efetuado um estudo, com base em ensaios laboratoriais, em que se simula a fase de progressão da erosão tubular em barragens de aterro. Foi utilizado o ensaio de erosão por fuga concentrada materializada através a execução de um furo (*Hole Erosion Test - HET*), para avaliar a erodibilidade de um solo, proveniente de alteração de maciços xisto-grauváquicos, com potencial para ser aplicado no aterro de barragens de aterro. Foram realizados 24 ensaios *HET*, em provetes parcialmente saturados, compactados com três energias predefinidas e com diferentes teores em água. Em particular, foi avaliada a influência das condições de compactação na erodibilidade do solo, nomeadamente, na respetiva taxa de erosão e na tensão de corte crítica. Foi observada uma influência relevante do teor em água de compactação na resistência à erosão do solo ensaiado. Foram complementarmente realizados dois ensaios *HET*, com molhagem prévia do solo na zona do furo, que mostraram a importância da expansibilidade do solo na progressão de erosão tubular.

ABSTRACT – The Hole Erosion Test (*HET*) was used to evaluate the erodability of a soil resulting from schist alteration, which has potential to be used in the core of an embankment dam or in a homogeneous embankment. There were performed 24 *HETs* with partially saturated samples. The samples were compacted with three predefined compaction energies and with different water contents. It was evaluated the influence of compaction characteristics in the erodability of the soil, namely, in the soil erosion rate and the ease of initiation of erosion (i.e. critical shear stress). A relevant influence of the water content in the resistance to erosion was observed. Additionally, there were performed two *HETs*, in which the sample was subjected to wetting, prior to the test, to evaluate the effect in erosion resistance of soil expansion..

PALAVRAS CHAVE – Barragens de aterro, erosão interna, erosão tubular, fuga concentrada em furo, erodibilidade.

1 – INTRODUÇÃO

As causas mais comuns de acidentes e de roturas em barragens de aterro estão associadas a processos de erosão interna, a galgamento e a escorregamento dos taludes. Historicamente, num universo de 11 192 barragens de aterro, cerca de 0,5% (1 em 200) ruíram devido a erosão interna e 1,5% (1 em 60) tiveram incidentes dessa natureza (Foster *et al.*, 2000). As frequências médias

* Bolseiro de Doutoramento, Departamento de Geotecnia, LNEC. E-mail: ricardos@lnec.pt

** Investigadora Coordenadora, Departamento de Geotecnia, LNEC. E-mail: laurac@lnec.pt

*** Professor Catedrático Jubilado, IST. E-mail: emn@civil.ist.utl.pt

mais elevadas de rotura por erosão interna através do corpo do aterro e da fundação tendem a estar associadas a barragens com zonamento que confere um menor controlo da percolação.

Considera-se, em geral, que o processo de erosão interna que conduz à rotura de uma barragem de aterro se desenvolve em quatro fases sequenciais: (i) iniciação, (ii) continuação ou filtração, (iii) progressão e (iv) formação de brecha. Santos e Caldeira (2008) apresentam uma revisão dos principais fatores que influenciam a ocorrência de cada uma dessas fases.

A erosão interna engloba diferentes tipologias, conforme a sua *iniciação*, nomeadamente: erosão através de fuga concentrada, erosão regressiva, sufusão e erosão no contacto entre solos. A erosão tubular (*piping*) é associada a uma fuga concentrada (tubo) que atravessa a barragem.

Uma vez iniciado um processo de erosão interna, a sua *continuação* ou, pelo contrário, a cicatrização depende, principalmente, das condições de saída do escoamento e da capacidade de transporte das partículas do solo. O desenvolvimento de processos de erosão interna, que culminam na rotura da barragem, é muitas vezes imputado à ausência de qualquer tipo de filtros, nomeadamente, no interior do aterro e na interface entre o aterro e a fundação. A continuação da erosão interna, em solos suscetíveis a um qualquer fenómeno de iniciação, pode ser evitada através da adoção de filtros granulares adequados em zonas de transição, onde se podem desenvolver gradientes hidráulicos importantes.

A presença de filtros, dimensionados de acordo com critérios atuais, pode parar eficazmente o processo de erosão interna, numa fase inicial, através da retenção das partículas arrastadas e da cicatrização de fugas concentradas de água (Maranha das Neves, 1991; Mínguez *et al.*, 2006; Sherard e Dunnigan, 1989; Vaughan e Soares, 1982).

Porém, filtros que não satisfaçam os adequados critérios de dimensionamento (ICOLD, 1994) ou que tenham sofrido segregação durante a construção podem conduzir à continuação do processo de erosão interna (Foster e Fell, 2000, 2001). Foster e Fell (1999) previnem ainda para a importância do detalhe dos filtros em zonas adjacentes a condutas e a descarregadores de cheias. Mesmo em barragens de aterro constituídas por filtros dimensionados de acordo com os critérios atuais pode ocorrer a continuação do processo de erosão interna através do aterro, caso sejam, involuntariamente, criadas zonas desprotegidas do sistema de filtragem.

No caso da ocorrência de erosão tubular, a *progressão da erosão* depende dos seguintes fatores fundamentais: da capacidade do tubo permanecer aberto, sem colapsar, durante tempo suficiente para o seu alargamento, da limitação do caudal por parte de zonas a montante do tubo (e.g. preenchimento do tubo com materiais a montante) e da suscetibilidade do solo sofrer erosão (erodibilidade). Este artigo foca-se essencialmente sobre este último fator.

A erodibilidade dos solos tem sido estudada através de diferentes tipos de ensaio, que podem ser agrupados em três categorias principais: ensaios de erosão superficial (e.g. Arulanandan e Perry, 1983; Hanson, 1991), ensaios de erosão interna através de fissuras ou de furos circulares (e.g. Maranhã das Neves, 1989; Maranhã das Neves, 1991; Wan e Fell, 2002, 2004a, b), e ensaios de dispersividade (e.g. AS1289. 3.8.1, 1977; Sherard *et al.*, 1976).

Maranhã das Neves (1991) refere que a capacidade resistente à erosão nas paredes de fissuras deverá estar associada à saturação do solo, podendo depender, para o mesmo tipo de água, da natureza mineralógica do solo, da compactidade e do teor em água de compactação do solo.

Em particular, o estudo laboratorial aqui apresentado foca-se na avaliação da influência das condições de compactação na erodibilidade de um solo residual de alteração de maciços xisto-grauvâquicos, com características típicas de materiais utilizados na construção de barragens de aterro em Portugal. É simulada a ocorrência de uma fuga concentrada numa barragem de aterro.

Neste estudo utilizou-se o ensaio laboratorial, designado por ensaio de erosão por fuga concentrada tubular, *HET – Hole Erosion Test*, descrito inicialmente por Wan e Fell (2004a), que permite avaliar as condições de erodibilidade de um solo parcialmente saturado, através de dois parâmetros fundamentais: a tensão de corte mínima para a qual se inicia a progressão da erosão (tensão de corte crítica) e, uma vez iniciada a erosão, a taxa com que se processa a erosão.

2 – ENSAIO DE EROSÃO POR FUGA CONCENTRADA TUBULAR (HET)

2.1 – Descrição do ensaio

Este ensaio é utilizado para simular a erosão interna numa fuga concentrada numa barragem de aterro, materializada através da execução de um furo.

Na Fig. 1 apresenta-se um diagrama esquemático do ensaio.

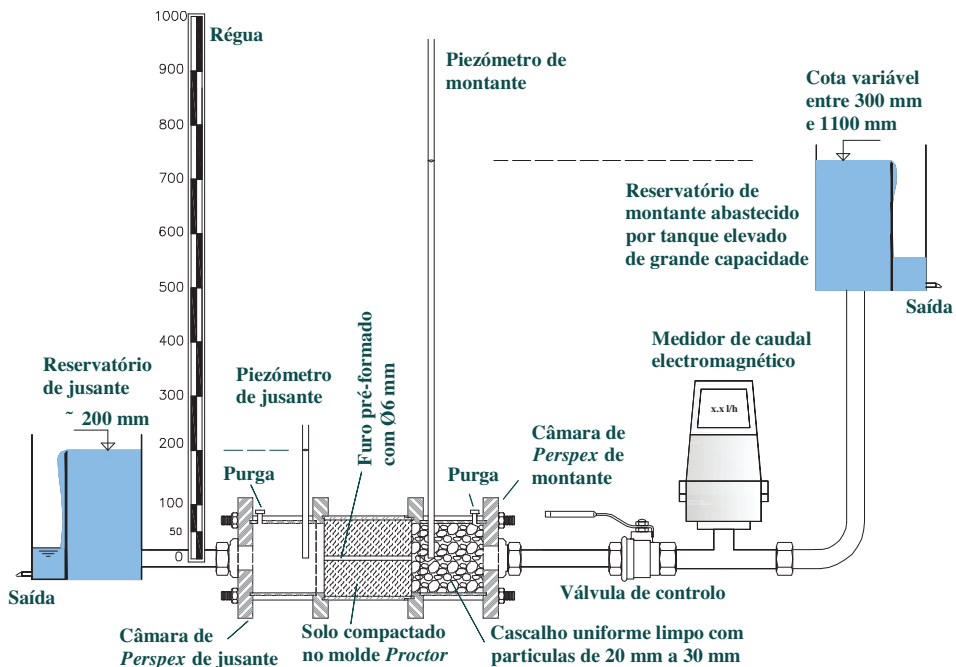


Fig. 1 – Diagrama esquemático do ensaio HET utilizado no LNEC (Santos *et al.*, 2010).

O equipamento de ensaio utilizado no estudo, semelhante ao referido por Wan e Fell (2004a), foi projetado e construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e consiste numa célula composta por duas câmaras de *perspex* (vidro acrílico), conectadas às extremidades do molde do ensaio de compactação tipo *Proctor* (molde pequeno) (Fig. 2). Nesse molde é compactado um provete de solo, com condições predefinidas de energia e de teor em água. A fuga concentrada é simulada através de um furo, com 6 mm de diâmetro, executado ao longo do eixo longitudinal do provete.

As câmaras de *perspex* são constituídas por duas placas quadradas, com 160 mm de lado e com 20 mm de espessura, coladas quimicamente a um tubo de 92 mm de diâmetro interior e 4 mm de espessura. A selagem das câmaras de *perspex* ao molde de compactação é efetuada com recurso a *o-rings*.

O tubo das câmaras de *perspex* dispõe de um orifício onde é ligado um tubo de plástico (utilizado como piezômetro), localizado junto à placa de interface com o solo, e de uma purga de ar, localizada na extremidade oposta.

A célula de ensaio, constituída pelo molde de compactação e pelas duas câmaras de *perspex*, é ligada a um sistema hidráulico.

O sistema hidráulico é constituído por dois reservatórios que mantêm a cota de água constante durante o ensaio. O reservatório de água de montante é abastecido por um tanque de grande capaci-

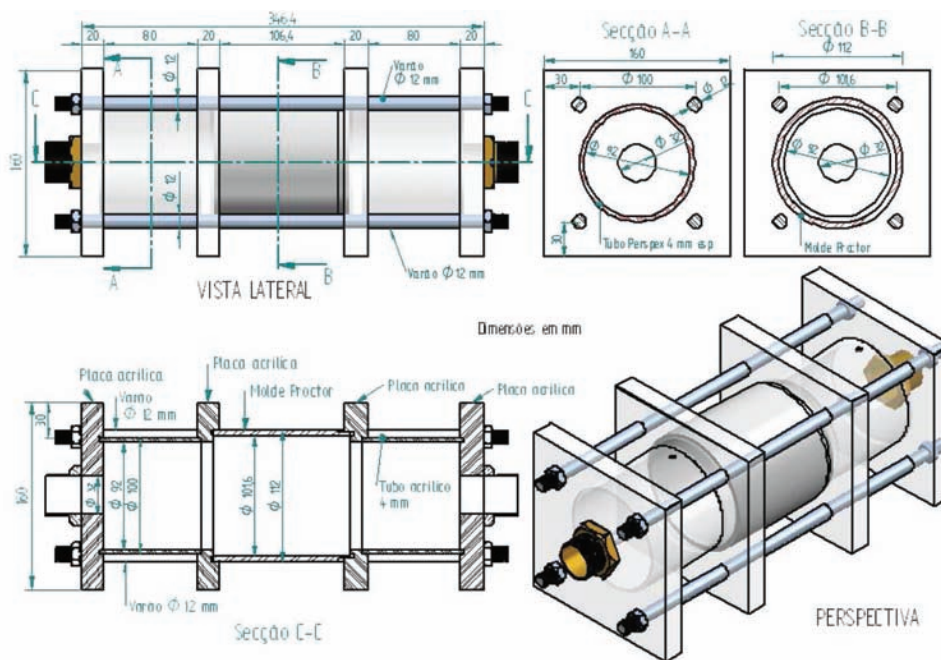


Fig. 2 – Célula de ensaio *HET* desenvolvida no LNEC.

dade, localizado a cerca de 2,5 m de altura. A água desse tanque é proveniente diretamente da rede pública.

Os reservatórios de água são ligados às câmaras de *perspex* através de tubos de borracha de 3/4" de diâmetro interior.

Entre o reservatório de montante e a célula de ensaio foram colocados um medidor de caudal do tipo eletromagnético (*Danfoss, MAGFLO® 6000*) e uma válvula de controlo. A maioria dos ensaios foi realizada com escoamento no provete de solo através do furo pré-formado orientado na horizontal.

Apenas num ensaio, a célula foi colocada, durante um certo período de tempo, com uma inclinação de cerca de 20° com a horizontal, com escoamento no sentido descendente.

Para uniformizar o fluxo de água à entrada do furo pré-formado foi colocado, no interior da câmara de *perspex* de montante, cascalho rolado limpo uniforme com partículas de dimensões que variam entre 20 e 30 mm.

A cota de referência, para a determinação da carga hidráulica, a montante e a jusante do provete, corresponde ao ponto central da secção transversal do furo. Em todos os ensaios realizados manteve-se água no tanque de jusante aproximadamente à cota 200 mm. O tanque de montante foi montado numa estrutura elevatória, que permite variar a cota de água entre 300 e 1100 mm.

2.2 – Medições efetuadas

Durante os ensaios *HET* procedeu-se ao registo, em intervalos regulares:

- do caudal de água que atravessa o provete de solo, com recurso ao medidor de caudal tipo eletromagnético;
- da altura piezométrica imediatamente a montante e a jusante do provete de solo, com recurso a piezómetros constituídos por um tubo de plástico de 5 mm de diâmetro interior conectado

nas câmaras de *perspex* da célula de ensaio; estes tubos foram colocados na vertical junto a uma régua, com o zero ao nível do centro do furo pré-formado;

- da evolução do topo de jusante do furo pré-formado, por observação visual através da câmara de *perspex* de jusante;
- do movimento das partículas na câmara de jusante e da turvação do efluente.

No início de cada ensaio procedeu-se ao registo da temperatura da água no tanque de jusante. O laboratório foi mantido a uma temperatura ambiente de 21°C em todos os ensaios.

No final de cada ensaio, procedeu-se ao preenchimento do furo com parafina derretida, para estimação do seu volume e da sua forma.

2.3 – Procedimento do ensaio

Apresentam-se os principais aspetos práticos relacionados com a realização dos ensaios, nomeadamente com: a preparação do solo, a compactação e furação do provete, a montagem do equipamento, o procedimento de ensaio e a desmontagem do equipamento e as medições posteriores do provete.

A preparação do solo foi efetuada através da separação ao peneiro nº.4 (4,76 mm), da determinação do teor em água e da correção da quantidade de água de modo a obter o teor em água predefinido e da homogeneização da amostra.

A compactação do provete foi efetuada com a energia de compactação predefinida, com recurso a um compactador mecânico automático, para evitar a variabilidade associada ao operador.

Aproximadamente duas horas após a compactação do provete, foi executado um furo, com uma broca de 6 mm, com recurso a um berbequim elétrico de baixa rotação e a uma guia de centragem (Fig. 3).

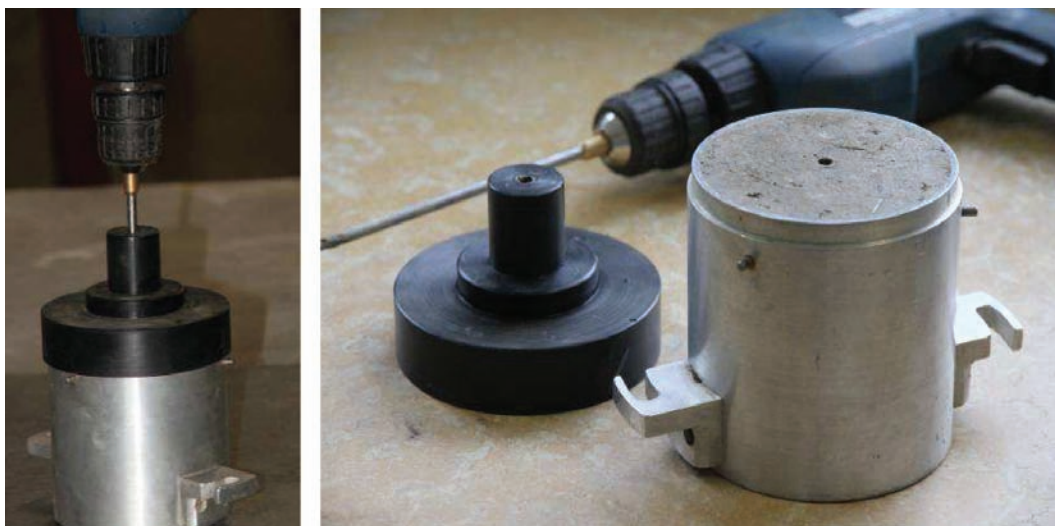


Fig. 3 – Furação do provete com recurso a uma broca de 6 mm e uma guia de centragem.

A montagem do equipamento iniciou-se com a introdução de cascalho rolado uniforme no interior da câmara de *perspex* de montante. Nos topos do provete foi colocado um geotêxtil anelar, com diâmetro interior de cerca de 25 mm e diâmetro exterior igual ao diâmetro do provete (o geo-

têxtil mostrou ser um elemento útil para evitar o desmoronamento excessivo dos topos do provete devido à ausência de suporte) e uma chapa anelar de alumínio furada, com diâmetro interior também de 25 mm, para suportar os geotêxteis e para evitar o arraste do cascalho rolado para o interior do furo pré-formado.

As câmaras de *perspex* de montante e de jusante foram conectadas ao provete por intermédio de quatro varões roscados (Fig. 4). A célula de ensaio foi colocada na horizontal e ligada ao sistema hidráulico através dos tubos de borracha, com a válvula de controlo fechada, para evitar a passagem de água do reservatório de montante para o interior do provete. O reservatório de montante foi elevado, através do sistema de roldanas, para a cota pretendida e procedeu-se ao seu enchimento.

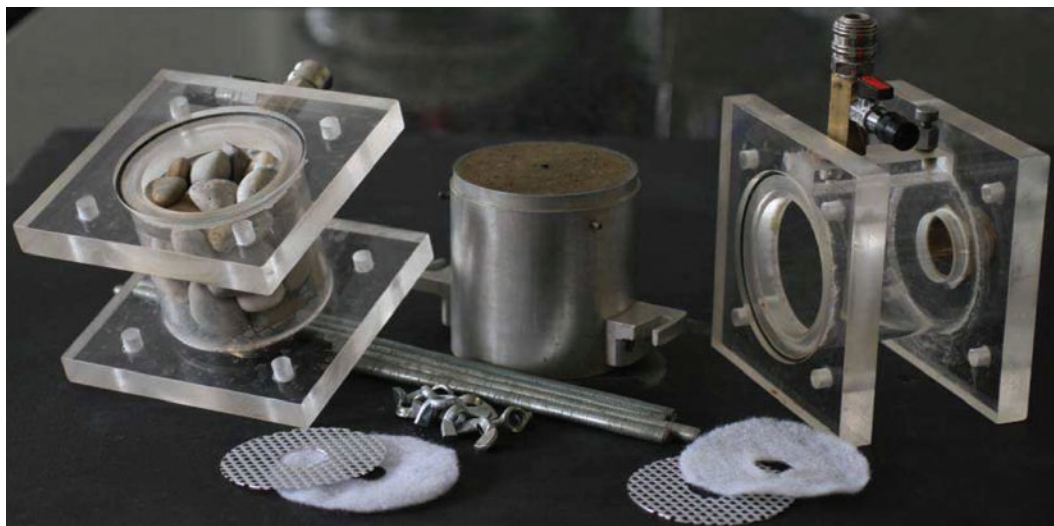


Fig. 4 – Componentes da célula de ensaio: câmara de montante (à esquerda), molde com provete de solo com furo pré-formado (ao centro) e câmara de jusante (à direita).

Na Fig. 5 e na Fig. 6 apresenta-se o aspeto geral do equipamento, previamente ao início de um ensaio.

No início do ensaio efetuou-se o registo da temperatura da água e procedeu-se à abertura das purgas de ar das câmaras de *perspex* e das ligações dos tubos para medição da carga hidráulica.

A célula de ensaio foi preenchida através do reservatório de jusante, de modo a evitar a erosão inicial do furo, com a válvula de controlo fechada.

Após saída de água fecharam-se as purgas de ar e ligaram-se os tubos de plástico para a medição da altura piezométrica nas extremidades da amostra.

O abastecimento ao tanque de jusante foi fechado assim que se atingisse a cota de descarga. Em seguida ligou-se o abastecimento de água ao reservatório de montante. O sistema hidráulico desde o tanque de montante ao medidor de caudal foi saturado e conectado à válvula de controlo.

Após abertura completa da válvula de controlo deu-se início da contagem do tempo de ensaio.

Durante o ensaio procedeu-se ao registo do caudal e das alturas piezométricas em intervalos regulares. As leituras foram efetuadas inicialmente com um intervalo de 30 segundos, sendo progressivamente aumentado o intervalo de leitura para 1, 2 e 5 minutos, dependendo da variação do caudal. O intervalo de leitura foi aumentado sempre que o caudal não variava entre três leituras consecutivas. Cada ensaio considerou-se finalizado quando:

- a) se atingiu 3 horas de ensaio e em três medições consecutivas, com intervalos de 5 minutos, o caudal não variou significativamente;

- b) o caudal atingiu 1000 l/h;
- c) o furo atingiu um diâmetro próximo de 25 mm;
- d) o furo colmatou ou colapsou.

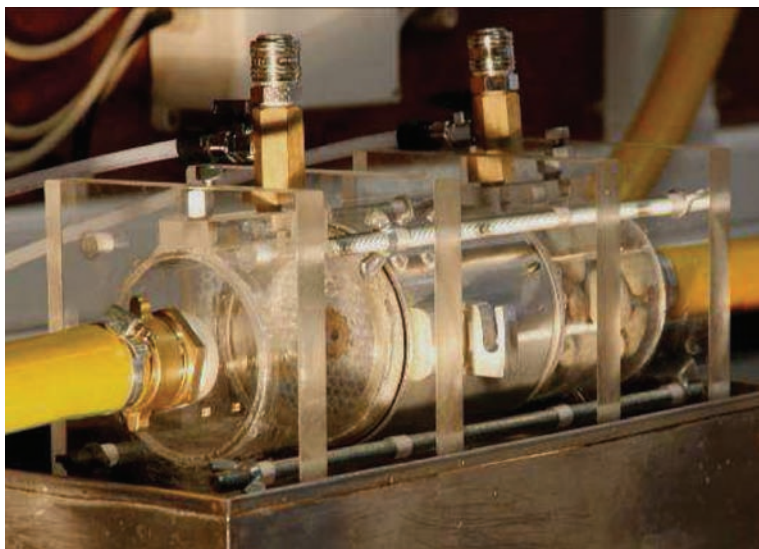


Fig. 5 – Realização do ensaio *HET*: aspecto da célula de ensaio pronta para ensaiar.

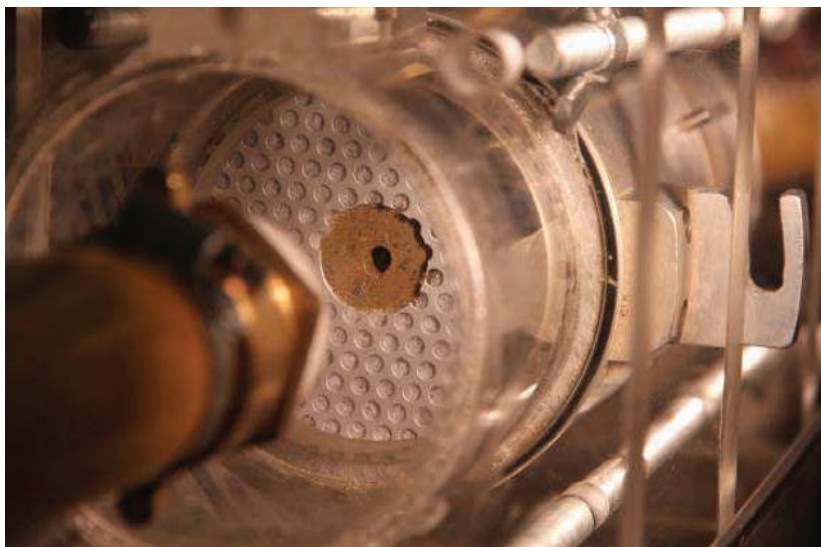


Fig. 6 – Realização do ensaio *HET*: vista de jusante no início do ensaio.

Na Fig. 7 apresenta-se uma imagem vista a partir da câmara de jusante em que é visível a erosão do furo pré-formado durante um ensaio *HET*, bem como a deposição de material erodido na base da câmara de jusante.

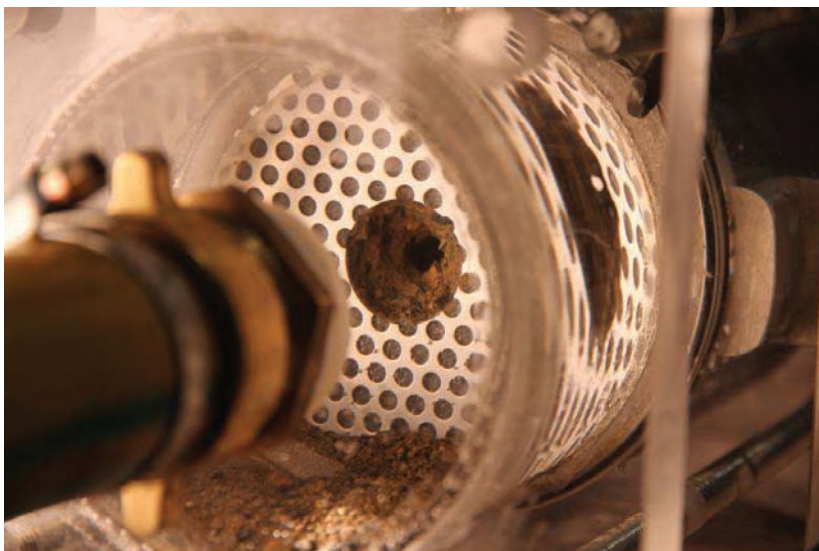


Fig. 7 – Erosão do furo pré-formado durante o ensaio *HET*.

A desmontagem do equipamento foi iniciada com o esvaziamento da célula de ensaio, através do reservatório de jusante. Esta operação foi efetuada lentamente e com cuidado para evitar o desmoronamento do furo.

Procedeu-se à remoção dos varões roscados que ligam as câmaras de *perspex* ao molde de compactação e remoção do molde da célula de ensaio. Na Fig. 8 (duas fotografias à esquerda) apresenta-se o aspeto do furo pré-formado de um provete no final do ensaio. Em seguida procedeu-se ao preenchimento do furo com parafina derretida, de modo a obter um molde do furo (*cf.* Fig. 8).

Após secagem da parafina, o provete foi extraído do molde de compactação e removeu-se o solo em redor do molde de parafina.

Procedeu-se à medição do diâmetro médio do molde do furo nos topos de montante e de jusante e em quatro secções intermédias equidistantes. O diâmetro equivalente do furo final foi estimado após medição do volume do molde em parafina.



Fig. 8 – Aspeto final do furo pré-formado de um ensaio: vista de montante (à esquerda), vista de jusante (ao centro) e molde do furo em parafina (à direita).

3 – INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS

Os fundamentos teóricos associados ao ensaio são baseados nos princípios do escoamento de fluidos viscosos através de tubos circulares de superfície rugosa.

Considerando o equilíbrio de forças num volume de controlo de um fluido (Fig. 9), que preenche totalmente um furo de secção circular e que se move por diferença de cota piezométrica, e atendendo às relações de continuidade e de momento (White, 1998), obtém-se, num dado instante t ,

$$\Delta h_t = \Delta Z + \frac{\Delta p_t}{\rho_w g} = \frac{4\tau_t}{\rho_w g} \frac{L}{D_t} \quad (1)$$

com,

$$\Delta h_t = i_t \cdot L \quad (2)$$

em que:

- Δh_t (m) é a perda de carga ao longo do furo, no instante t , num comprimento L ,
- ΔZ (m) é a diferença de cota entre as extremidades do furo,
- Δp_t (N/m²) é a diferença de pressão ao longo do comprimento do furo, no instante t ,
- ρ_w (kg/m³) é a massa volúmica do fluido,
- g (m/s²) é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²),
- τ_t (N/m²) é a tensão de corte no fluido, na superfície de contacto com o furo, no instante t ,
- D_t (m) é o diâmetro do furo, no instante t ,
- L (m) é o comprimento do furo,
- i_t – é o gradiente hidráulico ao longo do comprimento do furo, no instante t .

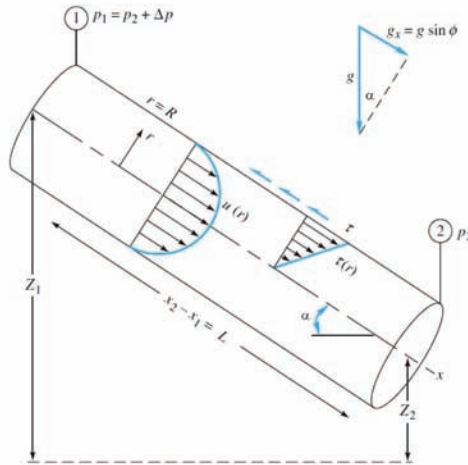


Fig. 9 – Volume de controlo de um escoamento entre duas secções de um tubo inclinado (White, 1998).

Para ensaios conduzidos com furos de eixo horizontal ΔZ é nulo. Combinando as equações (1) e (2) resulta

$$\tau_t = \rho_w \cdot g \cdot i_t \cdot \frac{D_t}{4} \quad (3)$$

A taxa de erosão corresponde à quantidade de massa de partículas sólidas que é efetivamente removida da superfície do furo pré-formado por unidade de tempo e de área em contacto com o fluido.

A taxa de erosão, a cada instante t , denotada por $\dot{\epsilon}_t$ (kg/s/m²), pode ser obtida através da seguinte relação (Wan e Fell, 2002)

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{1}{\psi_t} \frac{dM_t}{dt} \quad (4)$$

com,

$$\psi_t = \pi D_t \cdot L \quad (5)$$

e

$$dM_t / dt = \rho_d \cdot L \cdot dA_t / dt \quad (6)$$

em que:

- ψ_t (m²) é a área da superfície do furo pré-formado, no instante t ,
- dM_t / dt (kg/s) é a taxa de massa de partículas sólidas removida devido à erosão, no instante t ,
- ρ_d (kg/m³) é a massa volúmica seca do solo.

Para um furo de secção circular,

$$\frac{dA_t}{dt} = \frac{d(\pi D_t^2 / 4)}{dt} = \frac{\pi}{2} D_t \frac{dD_t}{dt} \quad (7)$$

Combinando as Equações (4), (5), (6) e (7), obtém-se a seguinte relação

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{\rho_d}{2} \frac{dD_t}{dt} \quad (8)$$

Resultados experimentais efetuados por vários investigadores com o objetivo de avaliar a erodibilidade dos solos (Arulanandan e Perry, 1983; Shaikh *et al.*, 1988), permitem constatar a existência, a partir de um dado valor limite, de uma relação entre a taxa de erosão, $\dot{\epsilon}_t$, e a tensão de corte hidráulica aplicada, τ_c .

Em geral, considera-se que para valores inferiores a esse valor limite não ocorre qualquer erosão relevante. Essa relação pode ser expressa através de (Cyril *et al.*, 2010):

$$\dot{\epsilon}_t = \begin{cases} C_e (\tau_t / \tau_c - 1)^\alpha, & \tau_t > \tau_c \\ 0, & \tau_t \leq \tau_c \end{cases} \quad (9)$$

em que:

- C_e (kg/(s.m²)) é um coeficiente de erodibilidade do solo,
- τ_c (N/m²) é designada por tensão de corte crítica e corresponde ao valor limite pelo que $\dot{\epsilon}_t = 0$,
- α é uma constante empírica.

Para interpretação do *HET* é usual considerar-se $\alpha = 1$ (Bonelli *et al.*, 2006). Neste caso a condição relativa à ocorrência de erosão corresponde a uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de erosão dada por

$$\dot{\epsilon}_t = k_{er} (\tau_t - \tau_c) \quad (10)$$

em que $k_{er} = C_e/\tau_c$ (s/m) é um outro coeficiente de erodibilidade. k_{er} corresponde um valor da ordem de 10^{-1} a 10^{-6} s/m. Wan e Fell (2004a) em face deste valor introduziram o índice de taxa de erosão (I_{HET}), definido como

$$I_{HET} = -\log(k_{er}) \quad (11)$$

Quanto maior o valor da tensão de corte crítica, τ_c , e menor o valor do coeficiente de erodibilidade, k_{er} , (i.e., maior o valor de I_{HET}), maior a resistência à erosão do solo.

Para provetes com grau de compactação de 95% e compactados com teor em água ótimo, em relação ao ensaio laboratorial de compactação leve, este parâmetro é designado por índice representativo de taxa de erosão, \tilde{I}_{HET} .

3.1 – Estimação do diâmetro do furo

As equações (3) e (8) permitem constatar que, para um dado instante t , e para gradientes constantes, a determinação da tensão de corte ao longo do furo pré-formado, τ_t , e a taxa de erosão por unidade de área do furo, $\dot{\epsilon}_t$, dependem, respetivamente, do diâmetro do furo, D_t , e da taxa de variação do diâmetro do tubo, dD_t/dt .

Porém, não é possível medir diretamente o diâmetro do furo durante o ensaio *HET*. O diâmetro do furo é estimado indiretamente, através da medição do caudal que atravessa o furo pré-formado e da carga hidráulica nos extremos do provete.

A estimação do diâmetro do furo, em qualquer instante t , durante o ensaio *HET*, depende das condições de escoamento (i.e., laminar ou turbulento).

O tipo do escoamento de água em tubos de secção circular depende do número de *Reynolds*, sendo turbulento para valores deste número superiores a 4000 e laminar nos restantes casos. Num escoamento através de um tubo de secção circular, o número de *Reynolds* é dado por (White, 1998)

$$R_e = \frac{\rho_w \bar{v}_t D_t}{\mu} \quad (12)$$

em que μ (Pa.s) é o coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido, que depende da temperatura (a 20°C a água tem $\mu = 10^{-3}$ Pa.s) e \bar{v}_t (m/s) é a velocidade média do escoamento no interior do tubo, no instante t . Para uma secção circular, \bar{v}_t pode ser obtido diretamente do caudal medido, Q_t (m³/s), assumindo que o caudal que percola através do solo é desprezável, através da equação

$$\bar{v}_t = \frac{4Q_t}{\pi D_t^2} \quad (13)$$

A equação (12) permite verificar que, para avaliar o tipo de escoamento, é necessário conhecer, em cada instante, o diâmetro do furo pré-formado.

Wan e Fell (2002) assumem que a tensão de corte, no instante t , é proporcional à velocidade média e ao quadrado da velocidade média, respetivamente, quando o escoamento é laminar ou turbulento, pelo que se obtém

$$\tau_{Lt} = f_L \bar{v}_t \quad (\text{laminar}), \quad \tau_{Tt} = f_T \bar{v}_t^2 \quad (\text{turbulento}) \quad (14)$$

em que f_{Li} (kg/m²/s) e f_{Ti} (kg/m³) são usualmente designados por coeficiente de atrito, respetivamente, para condição de escoamento laminar e turbulento, no instante t . Estas grandezas estão associadas à perda de carga ao longo do comprimento do tubo devido à rugosidade do solo. Considerando as equações (3) e (14) e resolvendo relativamente aos coeficientes de atrito obtém-se

$$f_{Li} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot \pi \cdot i_t \cdot D_i^3}{16 \cdot Q_i} \text{ (laminar)}, \quad f_{Ti} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot \pi^2 \cdot i_t \cdot D_i^5}{64 \cdot Q_i^2} \text{ (turbulento)} \quad (15)$$

Resolvendo as equações (15) em ordem ao diâmetro do furo, consoante o tipo de escoamento, obtém-se:

$$D_{Li} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot Q_i \cdot f_{Li}}{\pi \cdot \rho_w \cdot g \cdot i_t}} \text{ (laminar)}, \quad D_{Ti} = \sqrt[5]{\frac{64 \cdot Q_i^2 \cdot f_{Ti}}{\pi^2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot i_t}} \text{ (turbulento)} \quad (16)$$

3.2 – Procedimento para estimação do diâmetro do furo

A estimação do diâmetro do tubo pré-formado, D_i , envolve os passos indicados na sequência.

- Através da equação (15), calculam-se os fatores de atrito para a condição de escoamento laminar, f_{Li} , e para a condição de escoamento turbulento, f_{Ti} , para os instantes inicial, t_0 , e final, t_f , do ensaio, considerando, respetivamente, o diâmetro inicial ($D_0 = 6$ mm) e o diâmetro final do furo (D_f). D_f corresponde ao diâmetro equivalente do furo no final do ensaio, estimado através do volume do molde de parafina, considerando que este tem secção circular constante ao longo do seu comprimento.
- Estimam-se os fatores de atrito, para cada instante t , f_{Li} e f_{Ti} , considerando, como hipótese simplificativa, que estes variam linearmente entre t_0 e t_f .
- Através da equação (16), determinam-se os diâmetros do furo em cada instante t , D_{Li} e D_{Ti} .
- Através da equação (12), calcula-se o número de *Reynolds*, Re , em cada instante t , considerando os diâmetros dos furos para condições de escoamento turbulento e laminar. Se Re for superior a 4000 o escoamento é turbulento, caso contrário, o escoamento é laminar.
- Representa-se graficamente a evolução do diâmetro do furo no tempo.

3.3 – Estimação do índice de taxa de erosão, I_{HET} , e da tensão de corte crítica, τ_c

Em cada ensaio *HET*, a estimação de I_{HET} e de τ_c envolve os passos indicados na sequência.

- Através das equações (3) e (8), determinam-se, respetivamente, a tensão de corte, τ_b , e a taxa de erosão por unidade de área, $\dot{\epsilon}_t$, para cada instante t .
- Representa-se graficamente τ_t em abcissas e $\dot{\epsilon}_t$ em ordenadas. O coeficiente de erosão do solo k_{er} , corresponde à inclinação da reta de ajuste de $\tau_t \sim \dot{\epsilon}_t$.
- Determina-se a tensão de corte crítica, τ_c , como a ordenada da origem da reta.
- Através da equação (11), determina-se o índice de taxa de erosão, I_{HET} .

4 – PRINCIPAIS RESULTADOS DISPONÍVEIS NA BIBLIOGRAFIA

Apresenta-se um resumo dos principais resultados existentes na literatura relativamente à avaliação da erodibilidade dos solos com recurso ao ensaio *HET*.

Wan e Fell (2002, 2004b) realizaram um conjunto de ensaios, com o objetivo de estudar a erodibilidade de 13 solos de diferente mineralogia, granulometria, plasticidade e dispersividade. Na Fig. 10 apresentam-se as curvas granulométricas dos solos ensaiados.

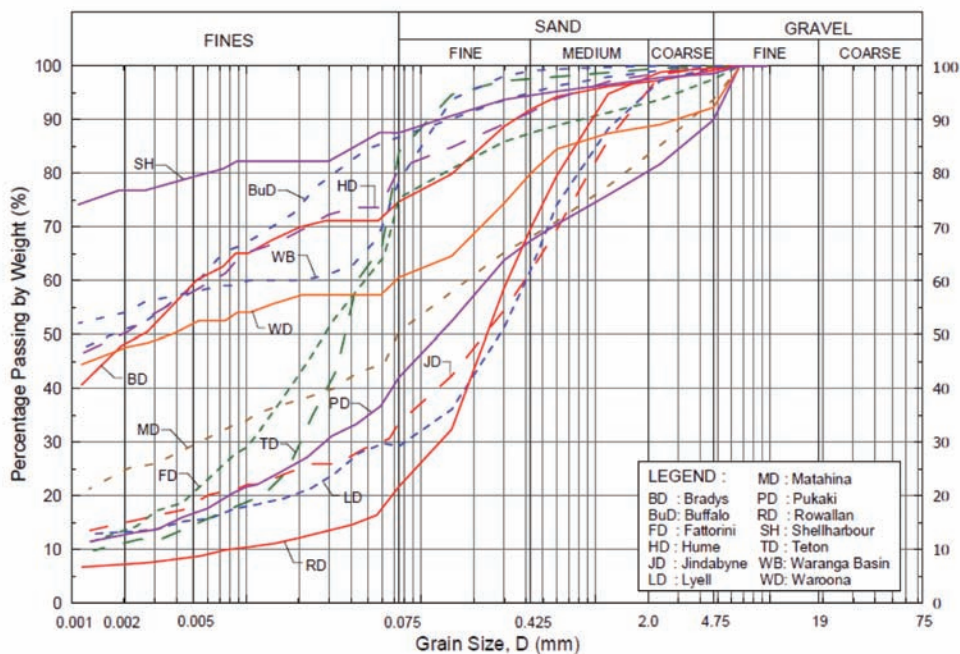


Fig. 10 – Granulometria dos 13 solos ensaiados por Wan e Fell (2002)

Nesse estudo os autores dividiram os diferentes tipos de solos em dois grupos: os solos finos (BD, BuD, FD, HD, MD, SH, TD, WB e WD) e os solos grossos (JD, PD, RD e MD).

Na sequência resumem-se as principais conclusões desse estudo.

O teor em água e o grau de compactação apresentaram uma influência relevante nos parâmetros de erodibilidade dos solos. Em particular, o coeficiente de erodibilidade (k_{er}), em alguns solos, apresentou uma variação máxima de cerca de 1000 vezes (variação do valor de I_{HET} de 3), devido às condições de compactação dos provetes.

Em geral, os solos grossos apresentaram parâmetros de erodibilidade mais reduzidos que os solos finos.

Os solos grossos com maior percentagem de finos apresentaram maiores parâmetros de erodibilidade (maior resistência à erosão). Porém, esta tendência não se verificou no caso dos solos finos.

Nos provetes de solos grossos o I_{HET} tende a aumentar com o grau de saturação.

Os solos grossos com maior percentagem de partículas de dimensão de areia apresentaram parâmetros de erodibilidade mais reduzidos, para as mesmas condições de compactação.

Em geral, os solos com maior percentagem de argila apresentam parâmetros de erodibilidade superiores. Este facto foi mais evidente nos solos grossos.

Os solos com finos não plásticos apresentaram parâmetros de erodibilidade relativamente reduzidos.

Foi observada uma tendência de aumento de I_{HET} nos solos menos dispersivos. A dispersividade dos vários solos foi avaliada através do ensaio *pinhole* (Sherard *et al.*, 1976).

Os autores consideram que as forças eletroquímicas que atuam nas partículas de argila e os catiões presentes na água têm uma influência relevante na erodibilidade dos solos finos. É referido que a mineralogia das argilas presentes nos solos finos deverá influenciar a sua erodibilidade. Solos finos que contenham minerais de esmectite e possivelmente de vermiculite aparentemente apresentam parâmetros de erodibilidade mais reduzidos.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, realizados com os 13 tipos de solos, os autores propuseram, como referência, uma classificação em 6 grupos (Quadro 1) da suscetibilidade à erosão de um solo com base no índice representativo de taxa de erosão, \tilde{I}_{HET} (i.e., para solo compactado com teor em água ótimo e com grau de compactação de 95%, relativamente ao ensaio de compactação leve).

Quadro 1 – Classificação da erodibilidade de um solo em função de \tilde{I}_{HET} (Wan e Fell, 2004b).

Grupo	Índice representativo da taxa de erosão, \tilde{I}_{HET}	Descrição da erosão através de uma fuga
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

Com base nesse estudo, Fell *et al.* (2008) assumiram uma relação entre o índice representativo da taxa de erosão, \tilde{I}_{HET} , e a classificação do solo, conforme apresentado no Quadro 2. Estas relações são consideradas apenas adequadas para solos com grau de compactação entre 95 e 98%, com desvio de teor em água, relativamente ao ponto ótimo, entre -1 a 2% e para solos não dispersivos. Para outras situações os autores recomendam a realização do ensaio *HET*.

Quadro 2 – Relação entre \tilde{I}_{HET} e a classificação do solo para solos não dispersivos (Fell *et al.*, 2008).

Classificação do solo	Índice representativo da taxa de erosão, \tilde{I}_{HET}		
	Mínimo provável	Melhor estimativa	Máximo provável
SM com finos < 30%	1	<2	2,5
SM com finos > 30%	<2	2 a 3	3,5
SC com finos < 30%	<2	2 a 3	3,5
SC com finos > 40%	2	3	4
ML	2	2 a 3	3
CL-ML	2	3	4
CL	3	3 a 4	4,5
CL-CH	3	4	5
MH	3	3 a 4	4,5
CH com $w_L < 65\%$	3	4	5
CH com $w_L > 65\%$	4	5	6

Os parâmetros de erodibilidade fornecidos pelo ensaio *HET* podem ser úteis para avaliar a fase de progressão do processo de erosão interna.

Em complemento dos resultados disponíveis na literatura considera-se importante avaliar com maior detalhe alguns fatores que se consideram influenciar os parâmetros de erodibilidade dos solos, nomeadamente:

- a energia de compactação dos provetes, para diferentes condições de teor de água e graus de saturação;
- a expansibilidade do solo por molhagem do furo que simula a fuga concentrada;
- a suscetibilidade de colmatação da fuga concentrada;
- o tempo de ensaio;
- o gradiente hidráulico;
- a diminuição da carga hidráulica a montante, após ocorrência de erosão.

5 – CARACTERISTICAS DO MATERIAL

O material utilizado nos ensaios foi colhido no interior da área delimitada pela albufeira da barragem de Odelouca (Algarve, Portugal), numa área de empréstimo explorada durante a sua construção, localizada junto à margem direita (indicada na Fig. 11). O material é constituído, essencialmente, por solo residual de alteração do maciço xisto-grauváquico.



Fig. 11 – Aspeto geral da área de empréstimo da barragem de Odelouca onde foi colhido o material utilizado nos ensaios.

No local de recolha, o material foi passado ao peneiro $\frac{3}{4}$ ” e colocado em sacos de aproximadamente 40 kg (Fig. 12). Foi recolhida uma quantidade de cerca de 2 toneladas deste material.

Foram realizados ensaios detalhados de caracterização física, que permitiram avaliar:

- a densidade das partículas sólidas;
- a granulometria;
- os limites de *Atterberg*;
- as características para diferentes energias de compactação;
- o coeficiente de permeabilidade.



Fig. 12 – Processamento do material colhido da área de empréstimo.

Na Fig. 13 apresentam-se as curvas granulométricas para o material passado ao peneiro $\frac{3}{4}$ " e para o material que passa no peneiro n.º.4, utilizado nos ensaios de compactação tipo *Proctor* e nos ensaios *HET*.

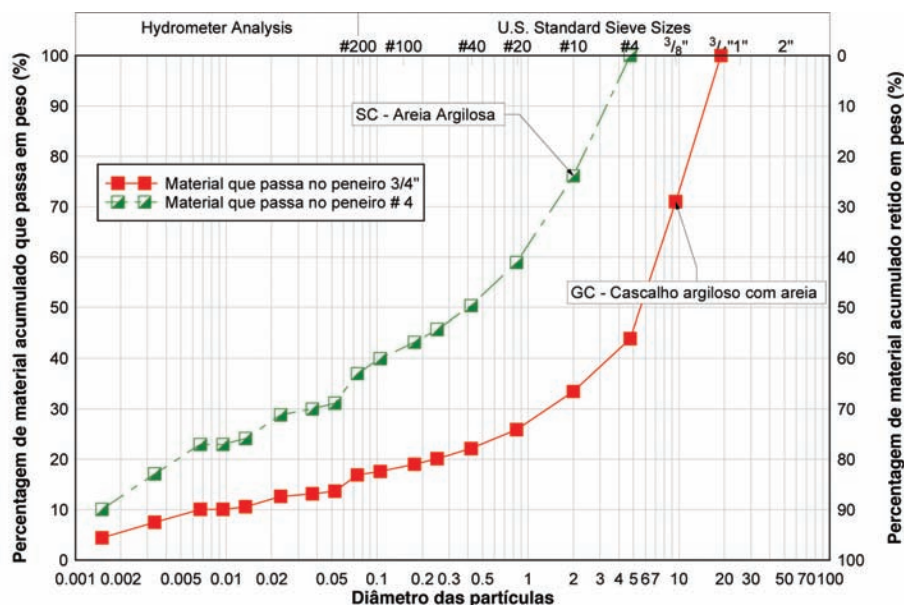


Fig. 13 – Curvas granulométricas do material utilizado nos ensaios *HET*.

Para o material que passa no peneiro ASTM n.º.4, foi conduzido um ensaio de compactação leve em molde pequeno, de acordo com a ASTM D698. A curva de compactação é apresentada a cheio na Fig. 14. Foram obtidos um teor em água ótimo de 14,4% e um peso volúmico seco máximo de 19,0 kN/m³.

No que se segue, o grau de compactação, G_c , e a variação de teor em água em relação ao ótimo, Δw , são referidos em relação a estes valores.

Para atender a situações de campo, de sobrecompactação ou de compactação deficiente, foram também ensaiados provetes com energia de compactação, respetivamente, superior e inferior à curva de compactação de referência.

Em particular, foi efetuado um ensaio de compactação pesada, de acordo com a ASTM D1557. A energia de compactação aplicada neste ensaio é cerca de 4,9 vezes superior ao ensaio de compactação de referência. A curva de compactação correspondente é apresentada a traço interrompido na Fig. 14. Foram obtidos um teor em água ótimo de 11,3% e um peso volúmico seco máximo de 20,3 kN/m³. Para um intervalo de teor em água de -1 a +2%, relativamente ao valor ótimo do ensaio de referência, o grau de compactação obtido neste ensaio tem um máximo de 104 % e um mínimo de 98 %.

Para considerar situações de compactação deficiente, foi efetuado um ensaio com energia de compactação inferior à correspondente ao ensaio de referência. Este ensaio de compactação foi realizado com o pilão pequeno, de 2,49 kg, e uma altura de queda de 30,5 cm. Foram aplicadas 14 pancadas em cada uma das 3 camadas de compactação. A energia de compactação aplicada neste ensaio corresponde a cerca de 56% do ensaio de compactação de referência. A respetiva curva de compactação é também apresentada a tracejado na Fig. 14. Foram obtidos um teor em água ótimo de 15,9% e um peso volúmico seco máximo de 18,4 kN/m³. Para um intervalo de teor em água de 1 a +2%, relativamente ao valor ótimo do ensaio de referência, o grau de compactação obtido neste ensaio tem um máximo de 96,6% e um mínimo de 90,6%.

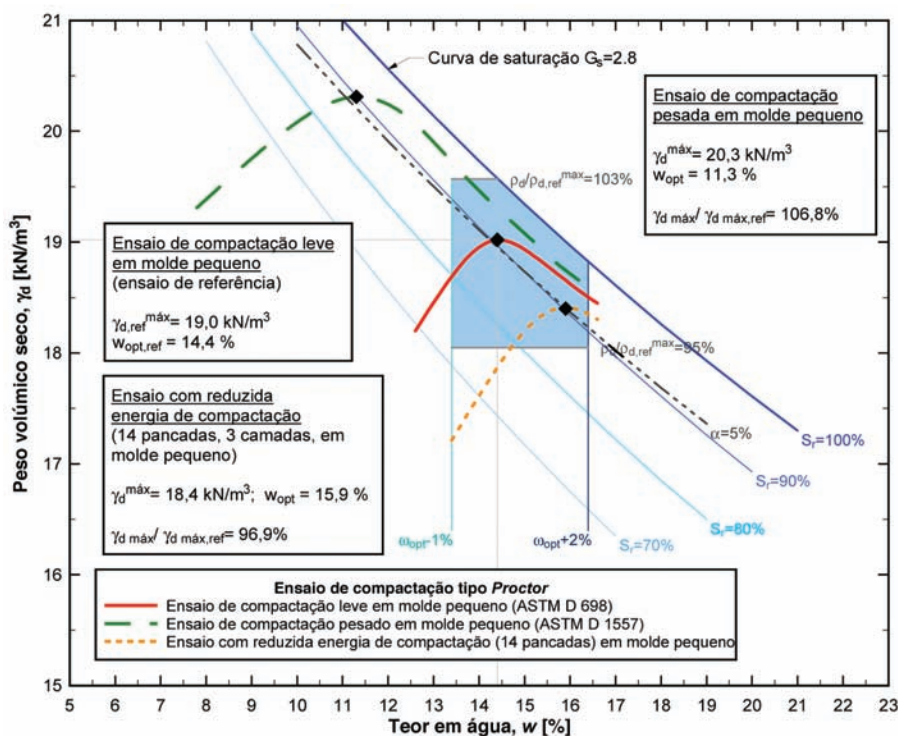


Fig. 14 – Características de compactação do material que passa no peneiro n.º 4.

Na Fig. 14 representa-se uma área a sombreado que corresponde ao intervalo de teor em água, Δw , de -1 a +2 % e de grau de compactação, G_c , de 95 a 103%, em relação aos valores de referência, que se consideram ser valores aceitáveis em barragens de aterro. Nessa figura apresenta-se ainda a curva de saturação, $S_r = 100\%$, bem como as curvas correspondentes a graus de saturação de 90, 80 e 70%.

Alonso (2005) refere que o ponto ótimo das curvas de compactação, associadas a diferentes energias, ocorre para percentagem de ar, α , de 5% (cf. Fig. 14). Para as energias de compactação

consideradas, observou-se ainda que ponto ótimo das curvas de compactação de ocorre para graus de saturação próximos de 90%.

No Quadro 3 apresenta-se um resumo das características do material passado ao peneiro ASTM nº.4, utilizado nos ensaios *HET*.

Quadro 3 – Resumo das principais características do material passado ao peneiro nº.4.

Densidade das partículas sólidas, G_s	2,8			
Análise granulométrica				
% Areia	62			
% Finos	38			
% Argila	12			
C_u	594			
C_c	1,08			
Limites de Atterberg †				
w_L (%)	37,7			
IP (%)	13,8			
Classificação USCS	SC – Areia argilosa			
Características de compactação	Energia de compactação			
	Leve	Modificada	“Reduzida”	
	w_{opt} (%)	14,4	11,3	15,9
	$\gamma_{d, \max}$ (kN/m³)	19,0	20,2	18,4
Permeabilidade				
k (m/s)	4×10^{-10}			

† Para o material passado ao peneiro nº. 40.

6 – PROGRAMA DE ENSAIOS *HET*

Os ensaios *HET* foram realizados em provetes compactados para as três energias de compactação referidas na Secção 5.

Para cada grupo de ensaios com a mesma energia de compactação, procurou-se ensaiar provetes com teores em água que variam num intervalo entre -1 e +2% (sombreado da Fig. 14), relativamente ao teor em água ótimo do ensaio de referência (ensaio de compactação leve). Foram pré-definidas as variações de teor em água de -1, 0, +1 e +2%.

6.1 – Características dos provetes dos ensaios *HET*

No Quadro 4 apresentam-se as características de compactação predefinidas em cada *HET*, em particular, a variação do teor em água, em relação ao valor ótimo do ensaio de compactação de referência, $(\Delta w)_p$, e o tipo de energia de compactação empregue. Para cada grupo de ensaios com a mesma energia de compactação, procurou-se ensaiar provetes com teores em água que variam num intervalo entre -1 e +2% (zona a sombreado da Fig. 14). São igualmente indicadas as condições hidráulicas a que cada provete foi submetido no ensaio, em particular, a perda de carga total inicial, Δh , e o respetivo gradiente hidráulico, i .

Adicionalmente, para cada *HET*, são indicadas as efetivas condições de compactação do provete, nomeadamente: o desvio do teor em água, Δw , e o peso volúmico seco, γ_d , e os corresponden-

tes grau de compactação, G_c , e grau de saturação, S_r . O grau de compactação variou entre 89 e 105,5%. O grau de saturação dos provetes ensaiados variou entre 58,9 e 95,7%.

Quadro 4 – Resumo das características de compactação dos provetes ensaiados e das condições hidráulicas iniciais.

Nº. do ensaio <i>HET</i>	Características de compactação pretendidas		Condições hidráulicas iniciais		Características de compactação efetivamente atingidas			
	$(\Delta w)_p \uparrow$ (%)	Energia de compactação *	Δh (mm)	i	$\Delta w \uparrow$ (%)	γ_d (kN/m ³)	$G_c \uparrow \uparrow$ (%)	S_r (%)
001	-1	Leve ^(a)	400	3,5	-2,0	18,42	96,8	70,6
002	0	Leve ^(a)	400	3,5	-0,4	18,72	98,4	83,9
002a	0	Leve ^(a)	400 ^(b)	4,8	-0,5	18,76	98,6	84,2
003	1	Leve ^(a)	555 ^(c)	6,9	1,2	18,81	98,9	94,6
004	-1	Reduzida	880	7,6	-1,0	17,21	90,5	63,0
004a	-1	Reduzida	880	7,6	-1,3	16,93	89,0	58,9
005	0	Reduzida	880	7,6	-0,1	17,81	93,6	73,8
006	1	Reduzida	850	7,4	0,4	18,30	96,2	82,7
006a	1	Reduzida	880	7,6	0,8	18,28	96,1	84,7
007	2	Reduzida	880	7,6	1,8	18,24	95,9	89,7
007a	2	Reduzida	875	7,6	1,6	18,41	96,8	91,0
008	-1	Leve	800	6,9	-1,1	18,66	98,1	79,2
009	0	Leve	880	7,6	-0,1	19,01	100	90,0
010	1	Leve	880	7,6	0,8	18,89	99,3	93,4
011	2	Leve	880	7,6	1,9	18,53	97,4	94,7
012	-1	Pesada	885	7,7	-1,8	20,07	105,5	95,7
012a	-1	Pesada	885	7,7	-1,3	19,86	104,4	95,7
013	0	Pesada	880	7,6	-0,2	19,38	101,9	95,3
014	1	Pesada	900	7,8	0,8	19,00	99,9	95,5
014a	1	Pesada	880	7,6	1,2	18,83	99,0	95,2
015	2	Pesada	860	7,5	1,9	18,57	97,6	95,3
015a	2	Pesada	860	7,5	1,8	18,61	97,9	95,6
101	2	Leve	860	7,5	2,2	18,45	97,0	95,1
102	-1	Leve	860	7,4	-0,6	18,87	99,2	84,7

† Desvio do teor em água em relação ao teor em água ótimo do ensaio de compactação de referência.

* Leve = Energia de compactação leve; Reduzida = Energia de compactação com 14 pancadas, com o pilão leve; Pesada = Energia de compactação pesada.

†† G_c = Grau de compactação em relação ao peso volumico seco máximo do ensaio de compactação de referência.

^(a) Ensaios preliminares, para aferir altura do tanque de montante.

^(b) O tanque foi elevado cerca de 150 mm, após 30 minutos sem qualquer erosão relevante visível a partir de jusante.

^(c) O tanque foi elevado cerca de 250 mm, após 30 minutos sem qualquer erosão relevante visível a partir de jusante.

6.2 – Tipos de ensaios

6.2.1 – Ensaios preliminares para aferição do gradiente hidráulico

Os primeiros quatro ensaios (001, 002, 002a e 003) foram conduzidos em provetes preparados com energia de compactação leve, com o objetivo de aferir o gradiente hidráulico a considerar, que resultasse em erosão relevante na generalidade dos provetes a ensaiar com diferentes condições de compactação.

Os ensaios 001 e 002, com provetes preparados logo após a compactação com teor em água de compactação, respetivamente, de 12,4 e 14%, foram realizados com um gradiente hidráulico de 3,5. Em ambos os ensaios o furo pré-formado colmatou no início do ensaio (em menos de 10 minutos). Nos ensaios posteriores, os provetes apenas foram colocados na célula de ensaio, no mínimo, duas horas após a compactação.

No provete do ensaio 002a, com características de compactação semelhantes às do ensaio 002, impôs-se, inicialmente, uma perda de carga igualmente de 400 mm. Após cerca de 30 minutos sem qualquer erosão relevante, visível a partir da câmara de jusante da célula de ensaio, elevou-se o tanque cerca de 155 mm. A partir dessa fase foi observado o início de erosão do furo após cerca de 10 minutos, tendo o ensaio decorrido por mais 90 minutos. No final do ensaio foi determinado o diâmetro médio do furo final de cerca de 15 mm.

Saliente-se que, para semelhantes condições de compactação e igual ação hidráulica ocorreram fenómenos distintos, tendo sido apenas alterado o tempo de espera do provete após compactação.

No ensaio 003, com provete compactado com teor em água de 15,6 % e com perda de carga de 555 mm (semelhante à do ensaio 002a após elevação do tanque de montante), não foi observada qualquer erosão significativa no furo pré-formado ao fim de 30 minutos. Optou-se por elevar o tanque cerca de 250 mm, tendo sido observada erosão moderada do furo ao fim de 120 minutos.

Os restantes ensaios foram realizados com desnível entre os depósitos a montante e a jusante de cerca de 900 mm. O Quadro 4 permite observar que, nestes ensaios, apesar da cota de água nos tanques ser constante, a perda de carga entre os topos do provete, obtida com recurso à medição dos níveis piezométricos, variou entre 850 mm e 900 mm. Esta situação justifica-se por uma variação da perda de carga, entre o tanque de montante e o topo de montante do provete, essencialmente, devido à variação da compacidade do cascalho rolado, colocado na câmara de montante. Adicionalmente, a variação da perda de carga ao longo do provete, entre ensaios, poderá dever-se à diferente estrutura interna dos provetes, devido à compactação e à expansibilidade do solo confinante com o furo.

6.2.2 – Ensaios realizados após compactação

Foram conduzidos 7 ensaios (004 a 007a) em provetes preparados com energia de compactação “reduzida” (inferior ao ensaio de referência) com diferentes teores em água. O ensaio 004a resultou da repetição do ensaio 004, em que o furo do provete colmatou completamente ao fim de 6 minutos. Os ensaios 006a e 007a foram conduzidos para confirmar o comportamento observado, respetivamente, nos ensaios 006 e 007. Nestes ensaios o furo pré-formado praticamente não sofreu erosão, à parte de um ligeiro desmoronamento dos topos, observado na generalidade dos ensaios.

Adicionalmente, foram conduzidos 4 ensaios (008 a 011) em provetes preparados com compactação leve. Na totalidade destes ensaios ocorreu erosão relevante do furo pré-formado.

Foram ainda conduzidos 7 ensaios (012 a 015a) em provetes preparados com compactação pesada com diferentes teores em água. O ensaio 012a resultou da repetição do ensaio 012, em que o furo do provete colmatou completamente ao fim de 23 minutos. Os ensaios 014a e 015a foram conduzidos para confirmar o comportamento observado no ensaio 014 e 015, respetivamente, em que o furo pré-formado praticamente não sofreu erosão.

6.2.3 – Ensaios realizados após molhagem do furo

A evolução da abertura de uma descontinuidade (fissura ou furo), devida à expansão do solo em função do grau de saturação e da pressão da água, é um fator importante na avaliação das características de erosão do solo. A diminuição da dimensão da descontinuidade devido à expansibilidade do solo poderá contrabalançar o valor da abertura inicial acrescida do aumento devido à erosão, podendo produzir a colmatação da descontinuidade (Maranha das Neves, 1991).

Maranha das Neves (1991), com recurso ao ensaio de erosão de fissuras, observou um valor médio da expansão de 2,38 mm, num material residual de xisto (com 50% de finos). Este valor resultou da introdução de água, numa fissura estabelecida entre uma placa de vidro acrílico e a parede de um provete, com uma geometria hemi-cilíndrica, obtido através da divisão de uma amostra tipo *Proctor*.

Para avaliar a influência da molhagem do furo pré-formado foram efetuados dois ensaios *HET* adicionais. Estes ensaios foram conduzidos com provetes compactados com a energia leve e com um desvio do teor em água de 2% (ensaio 101) e de -1% (ensaio 102), em relação ao valor ótimo do ensaio de compactação de referência. Pretendeu-se verificar provetes com desvio do teor em água para ambos os ramos da curva de compactação.

Nestes ensaios, após compactação e furação do provete, o molde foi colocado numa base impermeabilizada com plasticina na zona do alinhamento do furo.

O furo foi preenchido lentamente e no sentido ascendente, com recurso a uma seringa, para evitar o aprisionamento de ar.

Foi então introduzido um tubo, com diâmetro exterior de 6 mm, no interior do furo devidamente selado com plasticina e com silicone. O tubo foi preenchido com água até cerca de 8 cm acima do topo do provete (*cf.* a Fig. 15). Os provetes permaneceram nestas condições durante 48 horas, tendo sido mantido constante o nível de água.



Fig. 15 – Molhagem prévia do furo pré-formado (ensaio 102).

Após o referido período de molhagem, retirou-se o tubo de borracha e procedeu-se à estimação do diâmetro do furo pré-formado e da quantidade de material depositada no fundo do furo. Para tal foi sendo introduzido no furo uma série de varetas lisas de aço com diâmetro sucessivamente superior. A dimensão do furo final foi estimada com base na vareta com máximo diâmetro que se conseguiu introduzir manualmente. Esses valores encontram-se indicados no Quadro 5.

Quadro 5 – Características do furo pré-formado após molhagem.

Provetes do ensaio n.º	Diâmetro do furo após molhagem (mm)	Altura de material depositado no fundo (mm)
101	5,6	7
102	5	10

O diâmetro do furo do provete do ensaio 101 apresentou uma variação de apenas 7% por ação da molhagem. Refira-se que este provete foi compactado com um grau de saturação elevado

($S_r = 95,1\%$ - Quadro 4). No ensaio 102, em que o provete foi compactado com grau de saturação de 84,7%, observou-se uma variação de cerca de 17% no diâmetro do furo.

A menor expansibilidade observada nos ensaios *HET*, em relação à do ensaio de erosão de fissuras, apresentado anteriormente, poderá resultar do maior confinamento do material na zona do furo, face à que existe na parede da fissura, e do tipo de solo.

Foram realizados ensaios *HET* sobre os provetes submetidos a molhagem prévia (ensaios 101 e 102), não tendo sido observada erosão relevante em ambos.

7 – RESULTADOS DE ERODIBILIDADE DOS ENSAIOS

No Quadro 6 apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios *HET* realizados.

São indicados os ensaios em que o furo colmatou numa fase inicial do ensaio, os ensaios em que o furo praticamente não apresentou erosão e os ensaios em que se determinaram os parâmetros de erodibilidade, I_{HET} e τ_c .

Quadro 6 – Resumo dos principais resultados dos ensaios *HET*.

Nº. dos ensaios HET	Resumo dos principais resultados
001, 002, 004, 012	Furo colmatou numa fase inicial do ensaio
003, 006, 007, 007a, 014, 014a, 015, 015a, 101, 102	Furo praticamente não erodiu
002a, 004a, 005, 006a, 008, 009, 010, 011, 012a, 013	Determinados parâmetros de erosão, I_{HET} e τ_c

7.1 – Caudais percolados através do furo pré-formado dos provetes

Na Fig. 16 apresenta-se a evolução do caudal percolado através do furo pré-formado dos provetes 001 e 012, em que ocorreu colmatagem. Não se dispõe do registo relativo aos ensaios 002 e 004, em que também ocorreu a colmatagem completa do furo numa fase inicial do ensaio.

O ensaio 012 foi conduzido com uma perda de carga cerca de duas vezes superior à do ensaio 001. Os ensaios 001, 004 e 012 foram conduzidos em provetes preparados, respetivamente, com compactação leve, “reduzida” e pesada, com variação de teor em água superior a 1%, no ramo seco, em relação ao valor ótimo do ensaio de compactação de referência. O ensaio 002 foi conduzido para energia de compactação leve e para teor em água ligeiramente abaixo do ótimo.

Na Fig. 17 apresenta-se o registo temporal do caudal percolado através do furo pré-formado dos provetes nos ensaios em que foi possível determinar os parâmetros de erosão, nomeadamente, o índice de erosão, I_{HET} , e a tensão de corte crítica, τ_c . Nesta figura não se encontram representados os resultados dos ensaios preliminares.

Na generalidade dos ensaios observa-se um padrão de comportamento, em que, num período inicial, o caudal, percolado através do furo pré-formado, é tendencialmente crescente, mas a uma taxa reduzida. Na fase final do ensaio observa-se um rápido incremento do caudal.

7.2 – Estimativa da evolução do diâmetro do furo pré-formado

A estimação da evolução ao longo do ensaio do diâmetro do furo pré-formado, D_t , e da sua taxa, dD_t/dt , foi efetuada conforme descrito no ponto 3.2.

Na Fig. 18 apresentam-se, como exemplo, os resultados obtidos no ensaio 008.

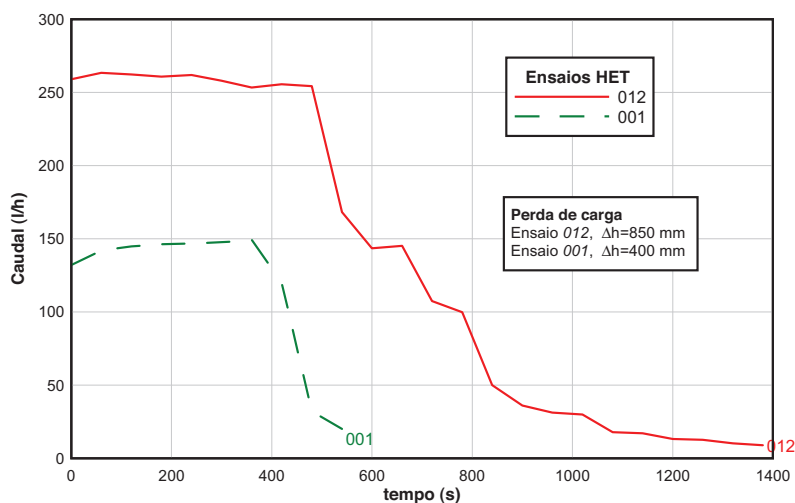


Fig. 16 – Evolução dos caudais percolados através dos furos pré-formados dos provetes 001 e 012, em que ocorreu colmatção do furo.

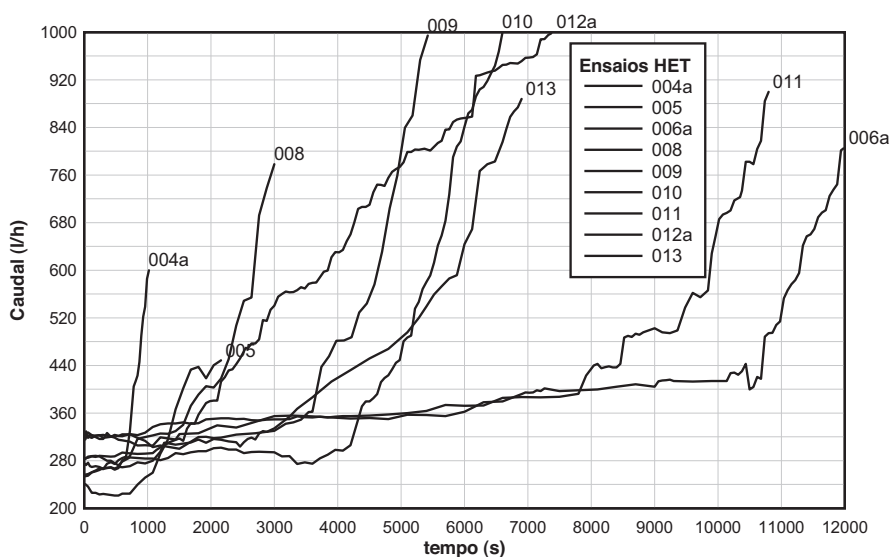


Fig. 17 – Evolução dos caudais nos ensaios de determinação dos parâmetros de erodibilidade.

Neste ensaio foi estimado um diâmetro final do furo de 18 mm, com recurso ao molde de parafina. A evolução do diâmetro do furo, D_f , foi obtida através da equação (16), considerando condições de escoamento turbulento, com base na evolução do caudal percolado pelo furo, representado na Fig. 17, e da perda de carga, obtida por medição da altura piezométrica a montante e a jusante do provete.

No Quadro 7 apresenta-se as características do escoamento através do furo pré-formado do provete, no início e no final do ensaio 008. O valor do número de Reynolds, Re , superior a 4000 durante o ensaio, permite verificar que o escoamento é efetivamente turbulento.

Quadro 7 – Velocidade do escoamento e condições de escoamento no início e final do ensaio 008.

Diâmetro do furo	\bar{v} (m/s)	R_e	Tipo de escoamento
Inicial, $D_0 = 6$ mm	2,72	$\approx 14\,000$	Turbulento
Final, $D_f = 18$ mm	0,81	$\approx 13\,000$	Turbulento

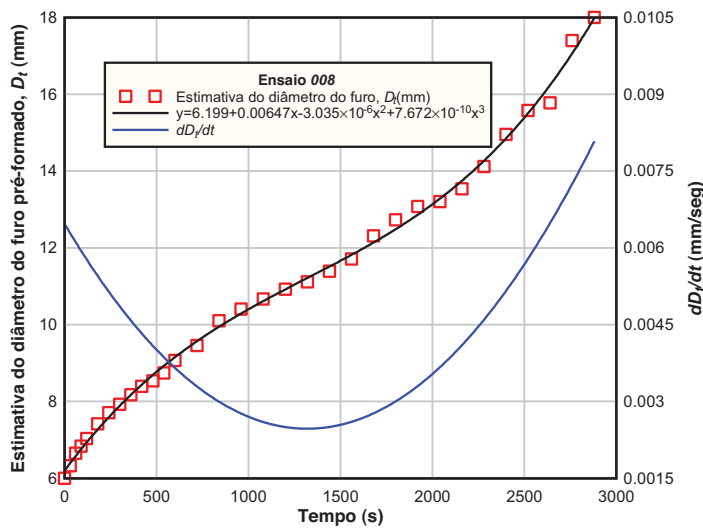


Fig. 18 – Estimativa do diâmetro do furo, D_f , e de dD_f/dt (ensaio 008).

7.3 – Estimativa do índice de taxa de erosão e tensão de corte crítica

A estimativa do índice de taxa de erosão, I_{HET} , e da tensão de corte crítica, τ_c , foi efetuada conforme descrito nos passos indicados no ponto 3.3.

Na Fig. 19 apresenta-se, como exemplo, a evolução da taxa de erosão por unidade de área, $\hat{\epsilon}_p$, em função da tensão de corte, τ , para o ensaio 008.

Na generalidade dos ensaios, na fase inicial, essa curva apresenta uma diminuição progressiva de $\hat{\epsilon}_p$ para um aumento de τ . Wan e Fell (2002) atribuem esse comportamento ao facto, de, na fase inicial do ensaio, o solo em redor do furo se apresentar perturbado devido ao processo de furação.

Adicionalmente, considera-se que a eventual expansibilidade do solo na parede do furo, devido à molhagem, poderá ser um fator determinante nesse comportamento observado na fase inicial do ensaio. Este assunto será referido com mais detalhe no ponto 8.4.

Após a fase descrita, a taxa de erosão aumenta com a tensão de corte, podendo ser aproximada a uma reta. O declive da reta permite determinar o coeficiente de erosão, k_{er} , e o respetivo índice de erosão, $I_{HET} = -\log(k_{er})$. A interseção da reta com o eixo das abcissas permite determinar a tensão de corte crítica, τ_c . Como exemplo, no ensaio 008, a análise da curva $\tau_i \sim \hat{\epsilon}_p$ apresentada na Fig. 19, permitiu obter os seguintes parâmetros: $k_{er} = 5,87 \times 10^{-5}$ s/m, $I_{HET} = 4,24$ e $\tau_c = 153,5$ N/m².

7.4 – Resumo dos parâmetros de erosão (I_{HET} e τ_c) resultantes dos ensaios HET

Na Fig. 20, para cada ensaio *HET* em que ocorreu aumento relevante do diâmetro do furo pré-formado, representa-se a reta que resulta da análise da curva experimental $\tau_i \sim \hat{\epsilon}_p$, obtida por regressão linear, no ramo em que $\hat{\epsilon}_p$ é crescente com a tensão de corte.

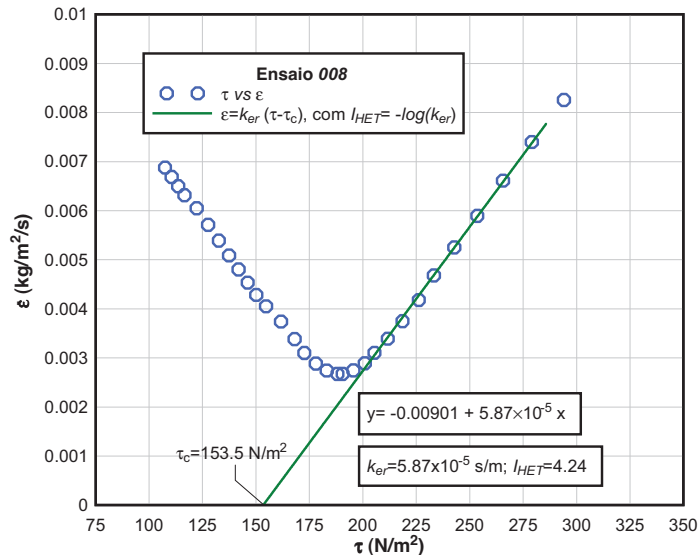


Fig. 19 – Estimação dos parâmetros de erosão, I_{HET} e τ_c (ensaio 008).

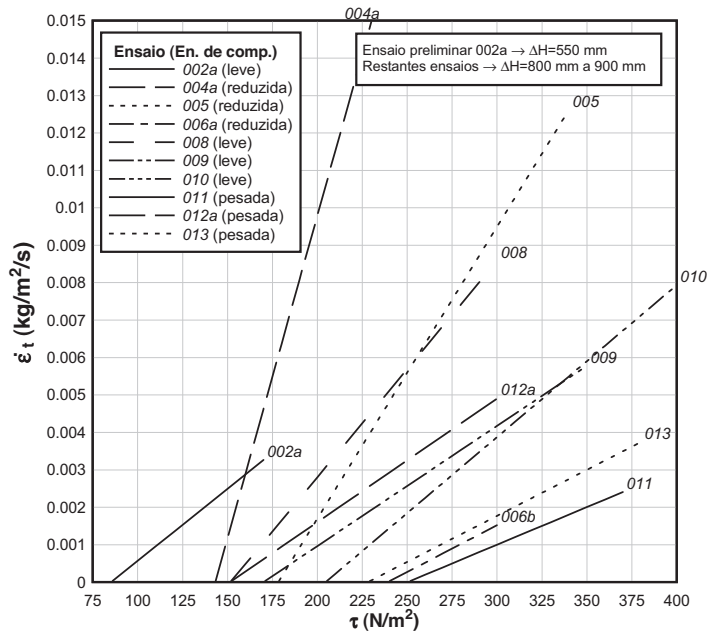


Fig. 20 – Regressões lineares resultantes das curvas $\tau_t \sim \dot{\epsilon}_t$ dos ensaios HET.

Os ensaios em que se observou uma maior erodibilidade correspondem aos que apresentam as retas de regressão com maior inclinação.

No Quadro 8 apresenta-se o resumo dos parâmetros de erosão, I_{HET} e τ_c , obtidos em cada ensaio. São igualmente apresentadas as principais características de compactação dos provetes utilizados nos ensaios.

Quadro 8 – Resumo dos resultados dos parâmetros de erosão dos ensaios *HET*.

Ensaio n.º	Energia de compactação *	Δh (mm)	Δw (%)	G_c (%)	S_r (%)	I_{HET}^\dagger	τ_c (N/m²)*
002a	Leve ^(a)	550	-0,4	98,6	84,2	4,40	85,2
003	Leve	800	1,2	98,9	94,6	>6	ND
004a	Reduzida	880	-1,3	89,0	58,9	3,76	143,2
005	Reduzida	880	-0,1	93,6	73,8	4,11	178,2
006	Reduzida	850	0,4	96,2	82,7	>6	ND
006a	Reduzida	880	0,8	96,1	84,7	4,60	239,1
007	Reduzida	880	1,8	95,9	89,7	>6	ND
007a	Reduzida	875	1,6	96,8	91,0	>6	ND
008	Leve	800	-1,1	98,1	79,2	4,24	151,5
009	Leve	880	-0,1	100,0	90,0	4,49	170,0
010	Leve	880	0,8	99,3	93,4	4,39	204,5
011	Leve	880	1,9	97,4	94,7	4,70	250,2
012a	Pesada	885	-1,3	104,4	95,7	4,48	151,4
013	Pesada	880	-0,2	101,9	95,3	4,61	228,0
014	Pesada	900	0,8	99,9	95,5	>6	ND
014a	Pesada	880	1,2	99,0	95,2	>6	ND
015	Pesada	860	1,9	97,6	95,3	>6	ND
015a	Pesada	870	1,8	97,9	95,6	>6	ND
101	Leve	860	2,2	97,0	95,1	>6	ND
102	Leve	860	-0,6	99,2	84,7	>6	ND

† Foi atribuído $I_{HET} > 6$ aos furos que, ao fim de 3 horas de ensaio, não apresentaram erosão.

* ND= não foi possível determinar dado que o furo não apresentou erosão relevante ($I_{HET} > 6$).

^(a) Ensaio preliminar.

Nos casos em que, após 3 horas de ensaio, não houve erosão relevante do furo pré-formado atribuiu-se um índice de erosão, I_{HET} , superior a 6 (erosão extremamente lenta). Nestes casos não foi possível determinar a tensão de corte crítica, dado que a tensão de corte, aplicada no furo pré-formado, não foi suficiente para provocar erosão.

À exceção das situações referidas, o índice de erosão, I_{HET} , variou entre 3,76 (ensaio 004a) e 4,70 (ensaio 011).

O índice representativo de taxa de erosão, \tilde{I}_{HET} , deverá ser próximo ao I_{HET} do ensaio 005 (provete com teor em água ótimo e grau de compactação próximo de 95%). De acordo com a classificação indicada no Quadro 1, para este material, a erosão através de uma fuga concentrada poderá ser considerada como moderadamente lenta, ou seja, \tilde{I}_{HET} entre 4 e 5.

8 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os parâmetros de erosão resultantes da interpretação dos ensaios *HET*, realizados em provetes, do mesmo material, compactados com três energias de compactação distintas.

No ponto 8.1 é analisada a influência do teor em água de compactação na resistência do solo à erosão. No ponto 8.2 são representados os parâmetros de erodibilidade de cada ensaio nas respetivas curvas de compactação. No ponto 8.3 são analisados os fatores que contribuem para a

suscetibilidade de colmatção do furo pré-formado. No ponto 8.4 é analisada a influência da saturação prévia das paredes do furo pré-formado na avaliação da progressão da erosão. Por fim, no ponto 8.5, são efetuadas algumas considerações relativas à influência do tempo de ensaio, nos casos em que não ocorreu erosão significativa.

8.1 – Influência do teor em água de compactação na erodibilidade do material

Na Fig. 21 e na Fig. 22 apresentam-se os gráficos que representam a influência do teor em água de compactação, w , respetivamente, no índice de erosão, I_{HET} , e na tensão de corte crítica, τ_c . Os resultados encontram-se agrupados por ensaios associados à mesma energia de compactação. Indicam-se as zonas correspondentes ao ramo seco e ao ramo húmido da curva de compactação do ensaio de referência, bem como o respetivo teor em água ótimo.

A análise desses gráficos permite efetuar as seguintes considerações.

A energia de compactação e o teor em água de compactação influenciam fortemente o índice de taxa de erosão, I_{HET} , e a tensão de corte crítica, τ_c .

Para provetes compactados com a mesma energia de compactação, observa-se uma tendência geral para o incremento da resistência à erosão (aumento de I_{HET} e de τ_c) com o aumento do teor em água de compactação. Excetua-se apenas o resultado obtidos no ensaio 010.

No ensaio 010, cujo provete foi obtido com energia de compactação leve, observou-se uma ligeira diminuição do I_{HET} , quando se aumentou o teor em água de compactação em +1%, em relação ao valor obtido no provete compactado próximo do ponto ótimo (ensaio 009), que apresenta máximo peso volúmico seco.

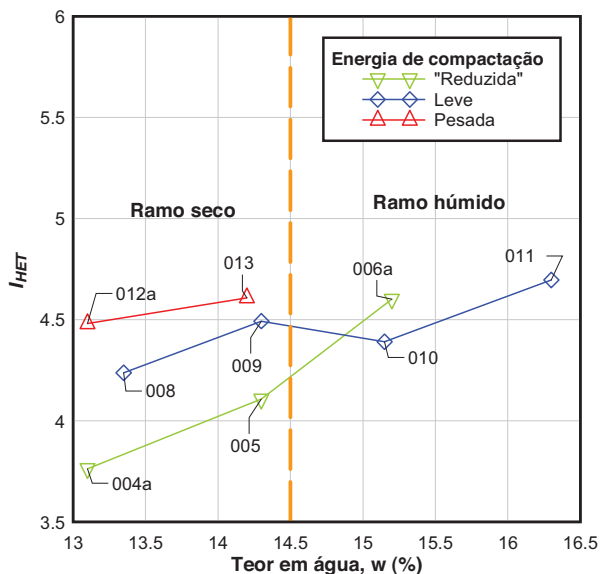


Fig. 21 – Influência do teor em água no I_{HET}

Para os provetes compactados com teores de água inferiores ao valor ótimo do ensaio de compactação de referência, observa-se, para um teor em água de compactação semelhante, um significativo aumento de I_{HET} quando se aumenta a energia de compactação.

Para os provetes compactados no ramo húmido, para as energias diferentes da normal, parece existir um valor a partir do qual não há erosão, função do desvio em teor em água.

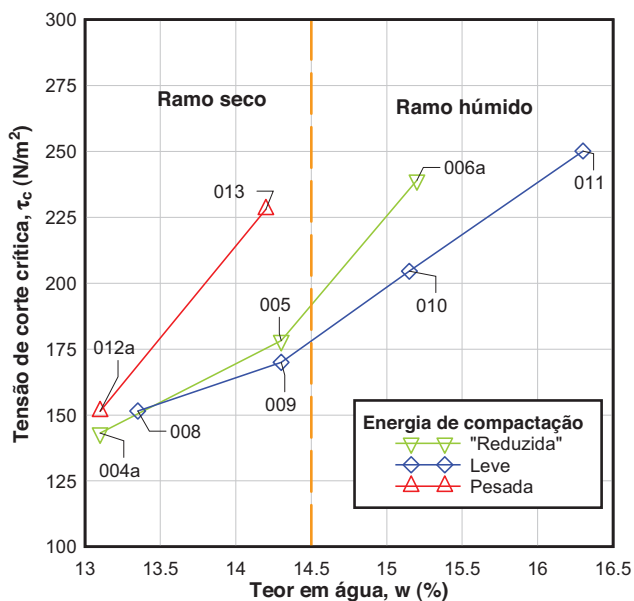


Fig. 22 – Influência do teor em água na τ_c .

Para os provetes compactados com a mesma energia de compactação a tensão de corte crítica tende a aumentar com o teor em água. Adicionalmente, para provetes compactados com teor de água próximo do valor ótimo de referência e para o ramo húmido a tensão de corte tende a aumentar com a energia de compactação.

8.2 – Parâmetros de erodibilidade representados nas curvas de compactação

Na Fig. 23 e na Fig. 24 apresentam-se os gráficos que representam a influência combinada do teor em água de compactação e do peso volúmico seco, respetivamente, no índice de erosão I_{HET} e na tensão de corte crítica, τ_c . Os resultados encontram-se agrupados por ensaios associados à mesma energia de compactação, indicando-se as correspondentes curvas de compactação. Adicionalmente, indicam-se as curvas relativas a grau de saturação de 100%, 90%, 80% e 70%.

A análise desses gráficos permite efetuar as considerações, relativas à influência combinada de w e de γ_d na resistência à erosão do solo, indicadas na sequência.

A máxima capacidade do solo resistir à erosão não ocorre para as condições de compactação associadas ao ponto ótimo da curva de compactação de referência.

Um provete compactado com um peso volúmico seco maior e do lado húmido, relativamente ao teor em água ótimo do ensaio de referência, apresenta, em geral, maior I_{HET} (maior resistência à progressão da erosão, uma vez iniciada) que outro provete compactado com um peso volúmico seco menor e do lado seco.

Para provetes compactados com energia de compactação “reduzida”, observa-se uma tendência geral para o incremento da resistência à erosão, aumento de I_{HET} e de τ_c , para peso volúmico seco crescente.

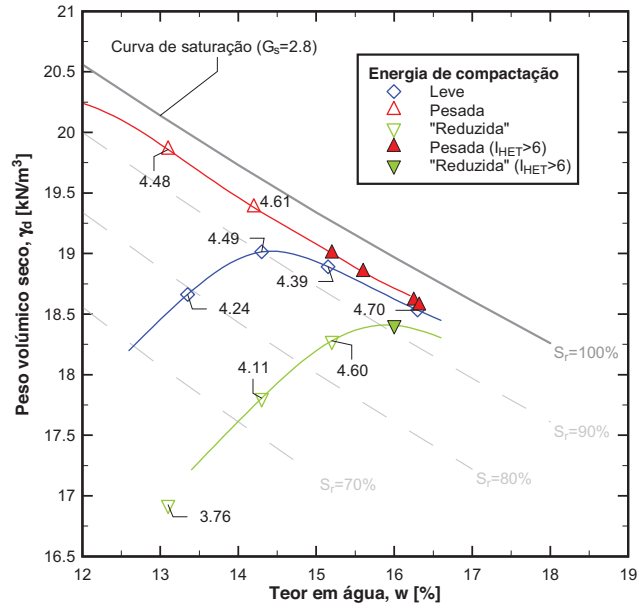


Fig. 23 – I_{HET} representado nas curvas de compactação.

Para provetes compactados com energia de compactação pesada, observa-se um incremento significativo no I_{HET} e na τ_c para aumento de γ_d no ramo seco, até ao valor máximo correspondente ao ensaio de compactação de referência.

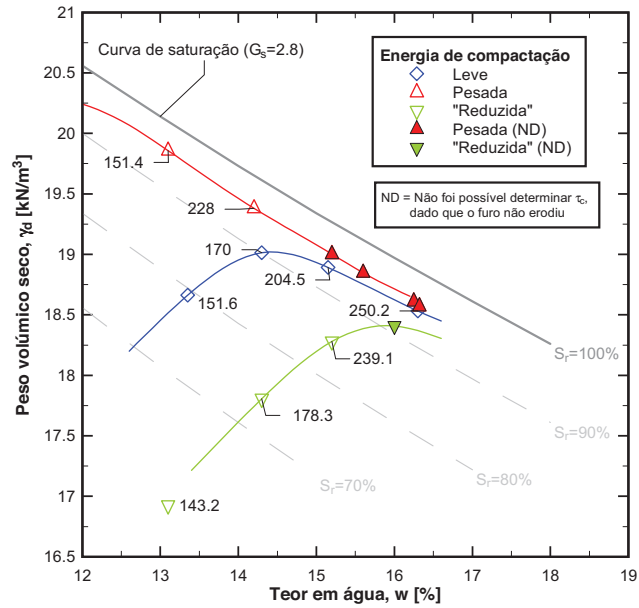


Fig. 24 – τ_c (N/m²) representada nas curvas de compactação.

8.3 – Suscetibilidade para ocorrência de colmatção do furo pré-formado

No Quadro 9 apresentam-se algumas características dos ensaios em que ocorreu a colmatção do furo, nomeadamente, o desvio do teor em água de compactação em relação ao ótimo do ensaio de referência, a respetiva energia de compactação aplicada e a duração do ensaio. Na Fig. 16 apresenta-se a evolução do caudal registado no medidor de caudal para os ensaios 001 e 012.

Foi observada uma suscetibilidade para ocorrência da colmatção do furo pré-formado em provetes compactados no lado seco, em relação à curva de compactação do ensaio de referência, independentemente da energia de compactação aplicada.

Quadro 9 – Ensaios *HET* em que ocorreu a colmatção do furo pré-formado.

Ensaio n.º	Δw (%)	Energia de compactação	Duração do ensaio † (minutos)	Observações
001	-2	Leve	9	Provetes ensaiados imediatamente após compactação. Observada muita turbidez no efluente.
002	-0,4	Leve	10	
004	-1	Reduzida	6	Observada muita turbidez no efluente. O ensaio 004a foi efetuado para repetir este ensaio, tendo revelado uma erodibilidade moderadamente rápida.
012	-1,8	Pesada	23	Observada muita turbidez no efluente.

† Considerou-se que ocorreu a colmatção do furo pré-formado para caudal medido inferior a 25 l/h.

Atendendo que no ensaio *HET* não é colocado um filtro a jusante, considera-se que a colmatção do furo pré-formado apenas poderá ocorrer devido a dois mecanismos distintos:

Retenção no interior do furo de partículas erodidas (ou aglomerados de partículas), que atuam como filtro para partículas de dimensão sucessivamente menores. O material utilizado nos ensaios foi passado pelo peneiro n.º4 (4,75 mm), porém, existem partículas com forma alongada cuja máxima dimensão é superior a 6 mm (diâmetro inicial do furo), com potencial para ficarem retidas no interior do furo.

Colapso do furo, quando o material não é capaz de sustentar um tubo aberto após molhagem. Refira-se que este mecanismo não foi observado nos ensaios realizados.

8.4 – Influência da molhagem prévia da parede do furo pré-formado

Para avaliar a influência da expansão do solo devido a molhagem, foram realizados dois ensaios com provetes compactados com energia leve, para situações limite de variação do teor em água. Foi considerada uma variação de teor em água de compactação de +2% (ensaio 101) e de 1% (ensaio 102), em relação ao valor ótimo do ensaio de compactação de referência. Nestes ensaios procedeu-se, previamente, à molhagem do provete através da introdução de água no furo pré-formado (*cf.* descrito no ponto 6.2.3).

Conforme indicado no Quadro 5, observou-se, após o período de molhagem, uma diminuição do diâmetro inicial do furo (6 mm) de cerca de 0,4 mm e de 1 mm, respetivamente, nos provetes dos ensaios 101 e 102. A maior expansibilidade do material do provete do ensaio 102 resulta deste ter sido compactado com um grau de saturação substancialmente menor que o provete 101.

Porém, a diminuição do diâmetro do furo por expansão do material poderá ter contribuído para uma redução da tensão de corte hidráulica aplicada (*cf.* a equação (3)), dado que os ensaios *HET*

101 e 102 não revelaram erosão relevante, para além de um ligeiro desmoronamento dos topos do provete, ao fim de 3 horas de ensaio.

Os ensaios 101 e 102 foram conduzidos em provetes com condições de compactação semelhantes aos ensaios, respetivamente, 011 ($I_{HET} = 4,7$; $\tau_c = 250,2 \text{ N/m}^2$) e 008 ($I_{HET} = 4,24$; $\tau_c = 151,5 \text{ N/m}^2$), em que não se efetuou molhagem prévia do furo. Nestes últimos foi observada erosão moderada, tendo sido possível determinar os parâmetros de erosão. A erosão ocorrida na fase inicial ter-se-á desenvolvido a uma taxa superior à da expansão do solo por molhagem. Este efeito conjunto poderá também justificar a observação experimental verificada no início da generalidade dos ensaios, em que as curvas $t \sim dD_i/dt$ (Fig. 18) e $\tau_i \sim \dot{\epsilon}_i$ (Fig. 19), apresentam um tramo descendente.

Imediatamente após o final dos ensaios, foi recolhida uma amostra, a meia secção do provete de solo, na periferia do furo pré-formado, para determinação do teor em água. Foi obtido um teor em água de 16,6 %, para o provete do ensaio 101 (valor idêntico ao teor em água de compactação), e de 15,4 %, para o provete do ensaio 102 (acréscimo de +1,6%).

8.5 – Influência do tempo de ensaio

Nos ensaios em que não ocorreu erosão no interior do furo pré-formado ao fim de um período de 3 horas, considerou-se que a tensão de corte hidráulica aplicada no início do ensaio é inferior à tensão de corte crítica do solo, para as condições de compactação do respetivo provete.

Para avaliar a influência, na resistência à erosão do solo, de uma duração de ensaio superior, os ensaios 101 e 102, em que não ocorreu erosão relevante, ao fim de 3 horas foram prolongados por um período de tempo muito superior. No Quadro 4 apresentam-se as características de compactação destes provetes.

No Quadro 10 e no Quadro 11 apresenta-se uma síntese das ações realizadas no decurso dos ensaios, respetivamente, 101 e 102, e transcrevem-se as observações mais relevantes. É igualmente apresentado o caudal medido em cada fase notável dos ensaios.

No ensaio 101 o provete foi submetido a dois períodos de 24 horas, em que se fez passar água continuamente através do furo pré-formado, com uma perda de carga total constante de cerca de 860 mm. Entre esses dois períodos a válvula de montante encontrava-se fechada e a água no tanque de jusante à cota 200 mm (acima do eixo do furo pré-formado).

Durante a totalidade da duração do ensaio o caudal percolado variou apenas 80 l/h, resultado, essencialmente, do ligeiro desmoronamento dos topos do provete (principalmente do lado de jusante) por ausência de suporte lateral.

Apesar do elevado volume de água percolado através do furo (15 400 litros), numa duração total de 48 horas, não foi observada erosão relevante.

Este resultado é consistente com os obtidos por Maranhã das Neves (1991), através de ensaios de erosão de fissuras de muito longa duração (cerca de 26 dias), com pressão de água constante de 50 kPa. O autor conduziu um ensaio num solo residual de xisto (teor em água ótimo de 16,6%), em que, ao fim de cerca de 19 000 litros de água percolados, através de uma fenda de 5 mm de espessura, as erosões foram extremamente reduzidas.

No ensaio 102 o provete foi submetido a passagem de água através do furo pré-formado, durante um período inicial de 3 horas, com uma perda de carga total constante de cerca de 860 mm.

O menor caudal verificado no início do ensaio 102 (230 l/h), face ao registado no ensaio 101 (250 l/h), resulta do diâmetro inicial do furo pré-formado ser ligeiramente inferior (*cf.* indicado no Quadro 5).

Após o período inicial do ensaio, fechou-se a válvula de controlo a montante da célula de ensaio. A válvula foi reaberta 16 horas depois, tendo o provete sido sujeito a ação erosiva durante um período adicional de 8 horas. Neste período não ocorreu erosão relevante do material.

Quadro 10 – Descrição do ensaio *101*, iniciado a 2010-03-18 e finalizado a 2010-03-22.

Tempo (horas)	Caudal (l/h)	Ação realizada	Observações
0	250	Abertura da válvula de controlo de montante.	Início do ensaio. Foi observado um efluente límpido.
½	290	-	Registado um ligeiro aumento do caudal, essencialmente, devido a um ligeiro desmoronamento dos topos do provete.
3	307	-	Não foi observada erosão relevante. Efluente límpido.
19	320	Fecho da válvula de controlo. Reabertura após 5 minutos.	Após reabertura da válvula, observou-se um ligeiro desmoronamento do topo de jusante do provete e o caudal aumentou ligeiramente para os 330 l/h.
24	335	Fecho da válvula de controlo.	O interior do furo praticamente não sofreu erosão. Durante este período de ensaio, o medidor de caudal registou um volume total de água de cerca de 7500 litros.
72	332	Reabertura da válvula de controlo de montante, após um período de 48 horas.	Após reabertura da válvula, não foi observado o transporte de partículas e o efluente encontrava-se límpido. O caudal medido era semelhante ao registado antes do fecho da válvula.
96	330	Fecho da válvula de controlo.	Neste período o caudal praticamente não variou. Desde o início do ensaio, no furo pré-formado passou um volume total de água de 7500 l + 7900 l = 15 400 litros. Após desmontagem do equipamento foi observado que o interior do furo praticamente não sofreu erosão.

Maranha das Neves (1991), através de ensaios de erosão de fissuras, observou uma importante contribuição da ação gravítica (dependente da orientação da fissura) no comportamento erosivo dos materiais estudados (solos residuais de xisto e de granito), em que fissuras inclinadas, com escoamento descendente, apresentaram maior erosão.

Assim, no ensaio *102*, previamente à reabertura da válvula de controlo de montante, inclinou-se a célula de ensaio 20° com a horizontal, de forma a obter escoamento descendente. Imediatamente após a reabertura da válvula de montante, o caudal medido foi semelhante ao verificado no final da anterior fase de ensaio. Porém, após alguns segundos o efluente ficou turvo e foi observado o transporte de partículas de dimensão grossa. Esta situação estabilizou ao fim de cerca de 20 minutos. O ensaio foi prolongado durante mais 2h:40m e, apesar das condições mais desfavoráveis a que o provete foi sujeito, não foi observada erosão relevante do furo pré-formado.

Relembra-se que os provetes dos ensaios *101* e *102*, previamente à colocação na célula de ensaio, foram submetidos a molhagem durante um período de 48 horas, através da introdução de água no furo.

Quadro 11 – Descrição do ensaio 102, iniciado a 2010-03-22 e finalizado a 2010-03-24.

Tempo (horas)	Caudal (l/h)	Ação realizada	Observações
0	230	Abertura da válvula de controlo de montante.	Início do ensaio. Foi observada alguma turbidez inicial que desapareceu ao fim de 1 minuto.
¼	250	-	Registado um ligeiro aumento do caudal, essencialmente, devido a um ligeiro desmoronamento dos topos do provete.
1	260	-	Não foi observada erosão relevante. Água límpida.
3	260	Fecho da válvula de controlo.	A válvula de controlo de montante foi fechada. Durante este período de ensaio, o medidor de caudal registou um volume total de água de cerca de 700 lts.
18	258	Reabertura da válvula de controlo de montante, após um período de 48 horas. ^(a)	Imediatamente após reabertura da válvula, a água apresentava-se com alguma turbidez, que desapareceu completamente ao fim de 30 segundos. O caudal medido semelhante ao registado antes do fecho da válvula.
26	247	Fecho da válvula de controlo.	Após mais 8 horas de ensaio, o interior do furo praticamente não sofreu erosão. A válvula de montante foi fechada. Durante este período de ensaio, o medidor de caudal registou um volume total de água de cerca de 2000 litros.
42	250	Inclinação da célula de ensaio 20° (escoamento descendente). Reabertura da válvula após um período de 16 horas. ^(a)	Inicialmente, foi observada alguma turvação na água e o transporte de partículas mais grossas. Após 20 minutos o caudal estabilizou nos 260 l/h.
45	265	Fecho da válvula de controlo.	Ao fim de mais 3 horas de ensaio o caudal praticamente não sofreu alteração. Desde o início do ensaio, no furo pré-formado passou um volume total de água de 2700 l + 800 l = 3500 litros. Após desmontagem do equipamento foi observado que o interior do furo praticamente não sofreu erosão.

^(a) O nível de água do tanque de jusante era de 200 mm, acima do eixo do furo pré-formado.

9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi avaliada a erodibilidade, através de uma fuga concentrada, de um solo parcialmente saturado, de alteração de um maciço xisto-grauváquico, num aterro de uma barragem, para várias condições de compactação.

Para a construção do aterro é assumida uma curva de compactação laboratorial de referência (compactação leve). Para atender a situações, de campo, associadas a compactação deficiente ou a sobre-compactação, foram também ensaiados provetes obtidos com energia de compactação, respetivamente, inferior e superior à curva de compactação de referência.

O estudo efetuado permitiu observar uma influência relevante do teor em água de compactação na erodibilidade do material ensaiado. Em geral, provetes compactados com maior teor em água resultam num comportamento associado a maior resistência à erosão através da descontinuidade pré-formada (maior índice de erosão). Porém, para condições semelhantes de teor em água de compactação, um aumento do peso volúmico seco não resulta, necessariamente, em condições associadas a menor erodibilidade.

Foi ainda identificado que os ensaios realizados com colmatação do furo pré-formado ocorreram em provetes compactados no lado seco, em relação à curva de compactação do ensaio de referência, independentemente da energia de compactação aplicada.

Os ensaios adicionais realizados, em que se procedeu a molhagem prévia do solo na zona da descontinuidade, mostraram ainda a importância da expansibilidade do solo, na fase de progressão da erosão tubular. Nestes ensaios observou-se uma alteração significativa no comportamento erosivo do solo (muito menos erosão), em relação a ensaios realizados sem molhagem, em provetes com condições semelhantes de compactação e para as mesmas condições hidráulicas exteriores aplicadas ao provete.

A análise efetuada baseia-se em ensaios laboratoriais, realizados em provetes parcialmente saturados. Assim, considera-se que este estudo é particularmente relevante para a fase do primeiro enchimento da albufeira, em que possa existir uma descontinuidade, que atravessa transversalmente o aterro, não detetada durante a fase de construção.

Os ensaios de longa duração efetuados reforçaram a hipótese assumida de apenas existir erosão significativa num solo, com determinadas condições de compactação, caso as condições hidráulicas forem suficientes para originar tensões de corte na descontinuidade superiores a um dado valor crítico (tensão de corte crítica).

Refira-se que, dada a complexidade do fenómeno erosivo em solos, podem existir outros fatores, que não foram analisados, que influenciam a erodibilidade dos solos.

10 – AGRADECIMENTOS

Aos técnicos de experimentação do departamento de Geotecnia do LNEC que participaram na preparação das amostras e na condução dos ensaios. Em particular, aos técnicos Fernando Rodrigues, António Cardoso e Joaquim Remédios pela exemplar dedicação e rigor na execução das tarefas. Ao senhor Raul Póvoa pelo excelente trabalho de construção das peças do equipamento de ensaio.

11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E. (2005). *Compaction et comportement de sols fins humides*. Revue Française de Géotechnique, nº111, pp. 33-43.
- Arulanandan, K.; Perry, E.B. (1983). *Erosion in relation to filter design criteria in earth dams*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 109(GT5), pp. 682-698.
- AS1289. 3.8.1 (1977). *Australian Standard (AS)1289. 3.8.1-1997, Methods of testing soil for engineering purposes, Method 3.8.1 - Soil classification tests - Dispersion - Determination of Emerson class number of a soil*.
- Bonelli, S.; Brivois, O.; Borghi, R.; Benahmed, N. (2006). *On the modeling of piping erosion*, Comptes Rendus Mécanique, 334(8-9), pp. 555-559.
- Cyril, G.; Yves-Henri, F.; Remi, B.; Chia-Chun, H. (2010). *Contact erosion at the interface between granular coarse soil and various base soils under tangential flow condition*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 136, nº 5, pp. 741-750.
- Fell, R.; Foster, M.; Cyganiewicz, J.; Sills, G.; Vroman, N.; Davidson, R. (2008). *A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping (draft guidance document dated August 21, 2008)*. Report UNSW Document: UNICIV R 446, The University of New South Wales, URS, and US Army Corps of Engineers.

- Foster, M.; Fell, R. (1999). *A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods*, Report UNICIV No. R-377, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Foster, M.; Fell, R. (2000). *Assessing embankment dam filters which do not satisfy design criteria*, Report UNICIV No.R-376, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Foster, M.; Fell, R. (2001). *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 127, nº 5, pp. 398-407.
- Foster, M.; Fell, R.; Spannagle, M. (2000). *The statistics of embankment dam failures and accidents*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 37, pp. 1000-1024.
- Hanson, G. (1991). *Development of a Jet Index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways*. Transactions of the ASAE, vol. 34, nº 5, pp. 2015-2020.
- ICOLD (1994). *Embankment dams - Granular filters and drains. Bulletin 095-1994*, In ICOLD. International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.
- Maranha das Neves, E. (1989). *Analysis of crack erosion in dam cores: the crack erosion test*. De Mello Volume: a tribute to Prof. Dr. Victor F.B. de Mello, São Paulo, Brazil, pp. 284-298.
- Maranha das Neves, E. (1991). *Comportamento de barragens de terra-enrocamento*, Tese de Doutorado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia (UNL - FCT), Lisboa, 371 p.
- Mínguez, R.; Delgado, F.; Escuder, I.; Membrillera, M.G. (2006). *Reliability assessment of granular filters in embankment dams*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 30, nº 10, pp. 1019-1037.
- Santos, R.; Caldeira, L. (2008). *Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas fundações*. Proc. XI Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, Portugal, 7-11 de Abril, Vol.II, pp. 345-352.
- Santos, R.; Caldeira, L.; Maranhã das Neves, E. (2010). *Influência da energia de compactação na erodibilidade de um solo sujeito a uma fuga concentrada*. COBRAMSEG'2010, Gramado, Brasil.
- Shaikh, A.; Ruff, J.F.; Charlie, W.A.; Abt, S.R. (1988). *Erosion rate of dispersive and nondispersive clays*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 114, nº 5, pp. 589-600.
- Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P. (1989). *Critical filters for impervious soils*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 115, nº 7, pp. 927-947.
- Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P.; Decker, R.; Steele, E.F. (1976). *Pinhole test for identifying dispersive soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102, nº1, pp. 69-85.
- Vaughan, P.R.; Soares, H.F. (1982). *Design of filters for clay cores of dams*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 108(GT1), pp. 17-31.
- Wan, C.F.; Fell, R. (2002). *Investigation of internal erosion and piping of the Slot Erosion Test and the Hole Erosion Test*. Report UNICIV No. R-412, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.

- Wan, C.F.; Fell, R. (2004a). *Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 130, n° 4, pp. 373-380.
- Wan, C.F.; Fell, R. (2004b). *Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams*. Geotechnical Testing Journal, vol. 27, n° 3, pp. 295-303.
- White, F.M. (1998). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill College.