

Influência da energia de compactação na erodibilidade de um solo sujeito a uma fuga concentrada

Ricardo Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, ricardos@lnec.pt

Laura Caldeira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt

Emanuel Maranha das Neves

Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, emn@civil.ist.utl.pt

RESUMO: Neste artigo é efectuado um estudo, com base em ensaios laboratoriais, em que se simula a fase de progressão da erosão em barragens de aterro, iniciada por uma fuga concentrada de água. Foi utilizado o ensaio de erosão em fugas concentradas (*HET – Hole Erosion Test*) para avaliar a erodibilidade de um solo, proveniente de alteração de maciços xisto-grauváquicos, com susceptibilidade de ser aplicado no aterro de uma barragem homogénea ou no núcleo de uma barragem de aterro zonada. Foi realizado um total de 22 ensaios *HET*, em provetes parcialmente saturados, obtidos com três energias de compactação predefinidas e com diferentes teores em água. Em particular, foi avaliada a influência do teor em água de compactação e do peso volúmico seco do solo nas condições de erodibilidade do solo, nomeadamente, na taxa de erosão do solo e na tensão de corte crítica. Foi observada uma influência relevante das condições de compactação (energia e teor em água) na erodibilidade do solo ensaiado.

PALAVRAS-CHAVE: barragens de aterro, erosão interna, *piping*, ensaio de erosão em fugas concentradas (*HET*), taxa de erosão, tensão de corte crítica, energia de compactação.

1 INTRODUÇÃO

Um processo de erosão interna que conduza à rotura de uma barragem de aterro desenvolve-se em quatro fases sequenciais fundamentais, designadas por: (i) iniciação da erosão, (ii) continuação da erosão ou filtração, (iii) progressão da erosão e (iv) formação de brecha. Santos e Caldeira (2008) apresentam uma revisão dos principais factores que influenciam a ocorrência de cada uma dessas fases.

O desenvolvimento de processos de erosão interna, que culminam na rotura da barragem, é muitas vezes imputado à ausência de qualquer tipo de filtros. A presença de filtros, dimensionados de acordo com critérios actuais, podem parar eficazmente o processo de erosão interna, através da retenção das partículas finas arrastadas e da cicatrização de fugas concentradas de água (Delgado *et al.* 2006, Sherard e Dunnigan 1989).

Porém, filtros que não satisfaçam adequados critérios de dimensionamento ou que tenham sofrido segregação durante a construção podem conduzir à continuação do processo de erosão interna (Foster e Fell 2001). Caso os filtros não estejam correctamente dimensionados e construídos, ou a erosão se processe para o exterior do aterro, o processo de erosão contínua até se formar um caminho de percolação preferencial que atravessa todo o elemento impermeabilizante do aterro (*piping*).

No caso de se desenvolver *piping*, a progressão da erosão depende de dois factores fundamentais: da capacidade do tubo permanecer aberto, sem colapsar, durante tempo suficiente para o seu alargamento, e da susceptibilidade do tubo sofrer erosão (erodibilidade).

A erodibilidade dos solos tem sido estudada por vários autores através de diferentes tipos de ensaio, que podem ser agrupados em quatro

categorias principais: ensaios de erosão superficial (Arulanandan e Perry 1983, Hanson 1991), ensaios de erosão interna através de fissuras ou de furos circulares (Maranha das Neves 1989, 1991, Wan e Fell 2004), e ensaios para avaliar a dispersividade das argilas (AS1289. 3.8.1 1977, Sherard et al. 1976).

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

Em particular, o estudo laboratorial apresentado foca-se na avaliação da influência das condições de compactação na erodibilidade de um solo residual de alteração de maciços xisto-grauváquicos, com características típicas de materiais utilizados na construção de barragens de aterro em Portugal.

Neste estudo utilizou-se o ensaio laboratorial, designado por ensaio de erosão em fugas concentradas, *HET – Hole Erosion Test* (Wan e Fell 2004), que permite avaliar as condições de erodibilidade de um solo parcialmente saturado.

Este ensaio permitir avaliar a erodibilidade de um solo, através de dois parâmetros fundamentais: da tensão de corte mínima para a qual se inicia a progressão da erosão (tensão de corte crítica), devido ao escoamento através da fuga concentrada, e, uma vez iniciada a erosão, da taxa com que se processa a erosão.

2 ENSAIO DE EROSIÃO EM FUGAS CONCENTRADAS (*HET*)

2.1 Descrição do ensaio

Este ensaio é utilizado para simular a erosão interna numa fuga concentrada existente numa barragem de aterro. Na Figura 1 apresenta-se um diagrama esquemático do ensaio.

O equipamento de ensaio, utilizado nos ensaios, foi projectado e construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (*LNEC*). Este consiste numa célula composta por duas câmaras de *perspex* (vidro acrílico) conectadas às extremidades de um molde utilizado no ensaio de compactação do tipo

Proctor (molde pequeno). Nesse molde é compactado um provete de solo, com condições predefinidas de energia e de teor em água. Uma fuga concentrada é simulada através de um furo, com 6 mm de diâmetro, executado no centro do provete ao longo do seu eixo longitudinal.

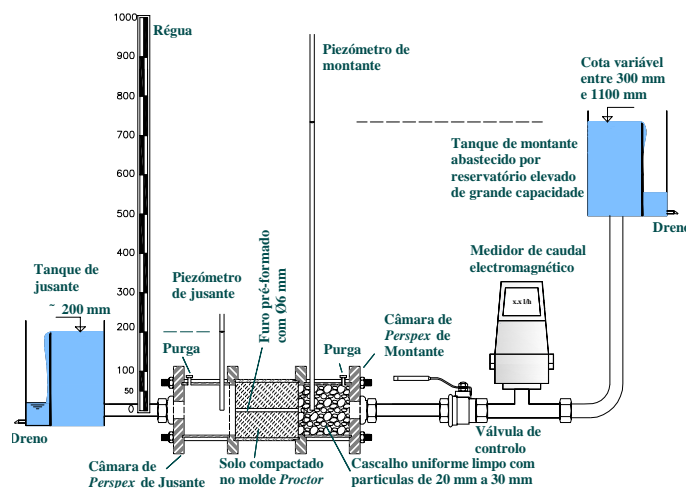


Figura 1. Diagrama esquemático do ensaio *HET*

A célula de ensaio, constituída pelo molde de compactação Proctor e pelas duas câmaras de *perspex*, é ligada a um sistema hidráulico, constituído por dois tanques, que permite estabelecer um gradiente hidráulico praticamente constante ao longo do comprimento da amostra durante todo o ensaio.

Um medidor de caudal do tipo electromagnético (*Danfoss, MAGFLO® 6000*) e uma válvula de controlo foram colocados entre o tanque de água, localizado a montante do equipamento, e a câmara de montante.

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 mm e 1100 mm.

2.2 Medições efectuadas

Durante os ensaios *HET* efectuados procedeu-se ao registo, em intervalos regulares: i) do caudal de água que atravessa o provete de solo, ii) da altura piezométrica imediatamente a montante e a jusante do provete de solo, com recurso a piezómetros conectados às câmaras de *perspex*, iii) da evolução do topo do furo pré-formado, por observação visual através da

câmara de *perspex* de jusante e iv) da turvação do efluente.

Em cada ensaio procedeu-se ao registo da temperatura da água e do ambiente.

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 Fundamentos Teóricos

Os fundamentos teóricos associados ao ensaio resultam de soluções analíticas da mecânica dos fluidos, em particular, do escoamento de fluidos viscosos através de tubos circulares de superfície rugosa (White 1998).

Para ensaios conduzidos em provetes com furos pré-formados orientados na horizontal, a tensão de corte no fluido, na superfície do furo pré-formado, no instante t , τ_t (N/m²), é dada por

$$\tau_t = \rho_w \cdot g \cdot i_t \cdot \frac{D_t}{4} \quad (1)$$

ρ_w (kg/m³) é a massa volúmica do fluido, g (m/s²) é a aceleração da gravidade, i_t é o gradiente hidráulico ao longo do comprimento da amostra de solo, no instante t , e D_t (m) é o diâmetro do furo pré-formado, no instante t .

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

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

ρ_d (kg/m³) é a massa volúmica seca do solo.

Em geral considera-se a existência de uma relação aproximadamente linear entre a taxa de erosão, $\dot{\epsilon}_t$, e a tensão de corte hidráulica aplicada, τ_t , ou seja, $\dot{\epsilon}_t = k_{er} (\tau_t - \tau_c)$.

k_{er} (s/m) é uma constante de proporcionalidade, usualmente designada por coeficiente de erosão do solo ou por taxa de variação da taxa de erosão, e τ_c (N/m²) é a tensão de corte crítica, que corresponde à situação $\dot{\epsilon}_t = 0$. k_{er} é um valor numericamente baixo, na ordem de 10⁻¹ a 10⁻⁶. Assim, é usual utilizar-se o índice de taxa de erosão,

$I_{HET} = -\log(k_{er})$, que apresenta uma ordem de magnitude que varia entre próximo de 0 (solo com erodibilidade extremamente rápida) e 6 (solo com erodibilidade extremamente lenta).

As equações (1) e (2) permitem constatar que, para um dado instante t , 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, $\dot{\epsilon}_t$, depende, respectivamente, do diâmetro do furo, D_t , e da derivada temporal do diâmetro do tubo, dD_t/dt .

Porém, não é possível medir directamente o diâmetro do furo durante o ensaio *HET*. Ao invés, o diâmetro do tubo é estimado, a cada instante, indirectamente, através da medição do caudal, Q_t (m³/s), que atravessa o furo pré-formado e da perda de carga hidráulica nos extremos do provete, $\Delta h = h_{montante} - h_{juvante}$.

A estimação do diâmetro do tubo, em qualquer instante t , durante o ensaio *HET*, depende das condições de escoamento (i.e., laminar ou turbulento). A totalidade dos ensaios realizados ocorreu com escoamento turbulento.

Com base nas medições efectuadas pode estimar-se, em cada instante t , o diâmetro do furo pré-formado, para escoamento turbulento, através da seguinte expressão (Wan e Fell 2004)

$$D_{Tt} = \left(\frac{64 \cdot Q_t^2 \cdot f_{Tt}}{\pi^2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot i_t} \right)^{1/5} \quad (4)$$

f_{Tt} (kg/m³) é usualmente designado por factor de atrito, no instante t , para condição de escoamento turbulento, dado por

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

Considerou-se que f_{Tt} varia linearmente entre o início e o final do ensaio.

3 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

3.1 Tipo e origem do material

O material utilizado nos ensaios foi recolhido no interior da área delimitada pela

albufeira da barragem de Odelouca (Algarve, Portugal), numa mancha de empréstimo explorada durante a sua construção, localizada junto à margem direita.

O material utilizado nos ensaios foi processado ao peneiro *ASTM n°4*.

3.2 Caracterização física do material

A determinação da densidade das partículas sólidas foi efectuada de acordo com a NP-83(1965). Foi determinado um valor da densidade das partículas sólidas, G_s , igual a 2,8.

A análise granulométrica do material foi efectuada por peneiração, conforme a especificação do LNEC E-239 (1970), para a fracção de solo com dimensões superiores a 0,075 mm, e por sedimentação, conforme a especificação do LNEC E-196 (1966), para o solo com dimensões inferiores a 0,075 mm.

Na Figura 2 apresenta-se a curva granulométrica para o material utilizado. O coeficiente de uniformidade, C_U , é de 594 e o coeficiente de curvatura, C_C , é de 1,08.

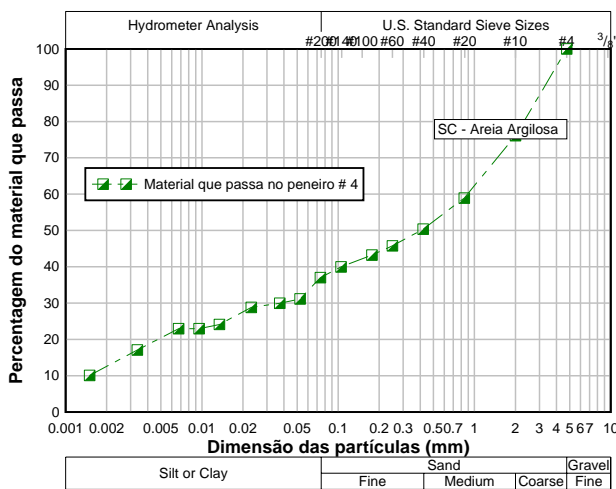


Figura 2. Curva granulométrica do material ensaiado.

Os limites de consistência foram determinados para a fracção fina do material, de acordo com a NP-143 (1969). Foi determinado um limite de liquidez, LL , de 37,7%, um limite de plasticidade, LP , de 23,9% e um índice de plasticidade, IP , de 13,8%.

De acordo com a classificação unificada dos solos (ASTM D-2487), o material é classificado como *SC – Areia argilosa*.

Para avaliação das características de compactação do material foi conduzido um ensaio de compactação leve em molde pequeno, de acordo com a ASTM D698. A curva de compactação é apresentada na Figura 3. Foram obtidos um teor em água óptimo de 14,4% e um peso volúmico seco de 19,0 kN/m³. Nas partes subsequentes deste artigo, estes correspondem aos valores de referência relativos a grau de compactação, GC , e a variação de teor em água em relação ao óptimo, Δw .

Foi ainda efectuada um ensaio de compactação pesada em molde pequeno, de acordo com a ASTM D1557. A curva de compactação correspondente é também apresentada na Figura 3. Foram obtidos um teor em água óptimo de 11,3% e um peso volúmico seco de 20,2 kN/m³.

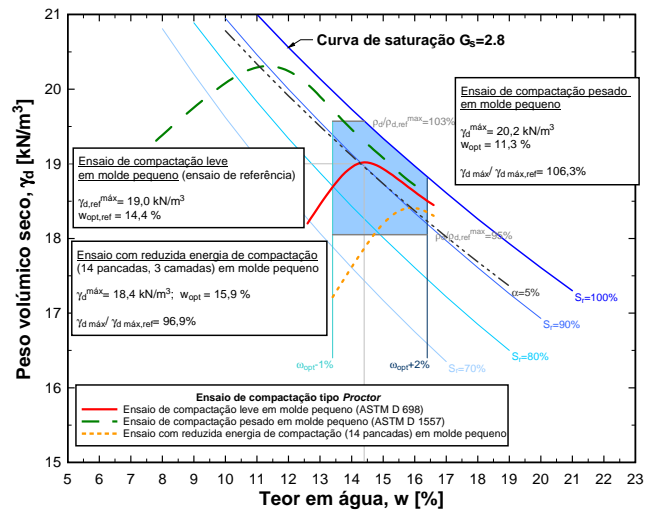


Figura 3. Curvas de compactação correspondentes às três energias de compactação consideradas nos ensaios.

Adicionalmente, foi efectuada um ensaio com energia de compactação inferior à correspondente ao ensaio de referência. Este ensaio foi realizado no mesmo molde *Proctor* de 4 polegadas, com o pilão pequeno de 2,49 kg e a altura de queda de 30,5 cm. Porém, foram aplicadas apenas 14 pancadas em cada uma das 3 camadas de compactação. A energia de compactação aplicada neste ensaio (designada por energia de compactação “reduzida”) corresponde a cerca de 56% do ensaio de referência. A respectiva curva de compactação é também apresentada na Figura 3. Foram obtidos um teor em água óptimo de 15,9% e um peso volúmico seco de 18,4 kN/m³.

Na Figura 3 representa-se ainda uma área a sombreado que corresponde ao intervalo de teor em água em relação ao óptimo, Δw , de -1% a +2 % e de grau de compactação, GC , de 95% a 103%, em relação aos valores de referência, que se consideram ser valores espectáveis em barragens de aterro. Na Figura 3 apresentam-se ainda as curvas para vários graus de saturação, $S_r=100\%$, 90%, 80% e 70%.

Alonso (2005) refere que o ponto óptimo das curvas de compactação, associadas a diferentes energias, ocorre para percentagem de vazios de ar, α , de 5% (ver Figura 3). Para as energias de compactação consideradas, observou-se ainda que ponto óptimo das curvas de compactação ocorre para grau de saturação próximo de 90%.

Para avaliação da permeabilidade do material foi efectuado um ensaio de permeabilidade com parede flexível de carga constante (ASTM D5084). Deste ensaio resultou um coeficiente de permeabilidade, k , de 5×10^{-8} cm/s.

4 PROGRAMA DE ENSAIOS *HET* E RESPECTIVOS RESULTADOS

Na Tabela 1 apresentam-se as características pré-definidas de compactação dos 22 provetes ensaiados, nomeadamente, a variação do teor em água, em relação ao valor óptimo do ensaio de compactação de referência, e a respectiva energia de compactação.

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 Figura 3). São igualmente indicadas as condições hidráulicas a que cada provete foi submetido no ensaio: perda de carga total, Δh , e o respectivo gradiente hidráulico, i .

Adicionalmente, na Tabela 1 são indicadas as efectivas condições de compactação obtidas nos provetes, nomeadamente: o teor em água, w , e peso volúmico seco, γ_d . Igualmente apresentam-se para cada provete o grau de compactação, GC , e o grau de saturação, S_r .

Os ensaios 01 a 03 foram conduzidos, em provetes com compactação leve, para aferir a altura a considerar no tanque de água de

montante, que resultasse em erosão relevante na maioria dos provetes a ensaiar com diferentes condições de compactação. Após estes ensaios estabeleceu-se o nível de água do tanque de montante aproximadamente nos 1100 mm.

Foram conduzidos 8 ensaios (04 a 07a) em provetes obtidos com energia de compactação “reduzida”, com diferentes teores em água. O ensaio 004a resultou da repetição do ensaio 004, cujo furo colmatou completamente ao fim de 6 minutos. Os ensaios 06a,b e 07a foram conduzidos para confirmar o comportamento observado, respectivamente, nos ensaios 06 e 07. Nestes ensaios o furo pré-formado praticamente não sofreu erosão, à parte de um ligeiro desmoronamento dos topos, devido à ausência de suporte lateral, observado na generalidade dos ensaios.

Adicionalmente aos 4 ensaios preliminares, foram conduzidos mais 4 ensaios (08 a 11) em provetes obtidos com energia compactação leve, com diferentes teores em água. Foi possível determinar os parâmetros de erodibilidade na totalidade destes ensaios.

Por fim, foram conduzidos 6 ensaios (12 a 15) em provetes obtidos com energia de compactação pesada, com diferentes teores em água. O ensaio 12a resultou da repetição do ensaio 12, cujo furo colmatou completamente ao fim de 23 minutos. O ensaio 14a foi conduzido para confirmar o comportamento observado no ensaio 14 em que o furo pré-formado praticamente não sofreu erosão.

Na Tabela 1 apresentam-se também os resultados dos ensaios, obtidos de acordo com os fundamentos teóricos referidos no § 2.3, nomeadamente, do índice, I_{HET} , e da tensão de corte crítica, τ_c .

Nos ensaios em que o furo colmatou não foi possível determinar qualquer parâmetro de erosão.

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

Tabela 1. Características dos ensaios realizados e resultados dos parâmetros de erodibilidade

Ensaio	Características de compactação predefinidas		Condições hidráulicas iniciais		Características de compactação efectivamente de ensaio				Parâmetros de erodibilidade calculados	
	Δw_{opt} (%) †	Energia *	Δh (mm)	i	w (%)	γ_d (kN/m ³)	GC (%)	S_r (%)	I_{HET} ††	τ_c (N/m ²) [#]
01	-1	Leve	400	3,5	12,4	18,42	96,8	70,6	FC	-
02	0	Leve	400	3,5	14	18,72	98,4	83,9	FC	-
02a	0	Leve	550 ^(a)	4,8	13,96	18,76	98,6	84,2	4,4	85,2
03	1	Leve	800 ^(b)	6,9	15,55	18,81	98,9	94,6	6,0	ND
04	-1	Reduzida	880	7,6	13,4	17,21	90,5	63,0	FC	-
04a	-1	Reduzida	880	7,6	13,1	16,93	89,0	58,9	3,76	143,2
05	0	Reduzida	880	7,6	14,3	17,81	93,6	73,8	4,11	178,2
06	+1	Reduzida	850	7,4	14,8	18,30	96,2	82,7	6	ND
06a	+1	Reduzida	850	7,4	15	18,26	96,0	83,2	FC	-
06b	+1	Reduzida	880	7,6	15,2	18,28	96,1	84,7	4,60	239,1
07	+2	Reduzida	880	7,6	16,2	18,24	95,9	89,7	6	ND
07a	+2	Reduzida	875	7,6	16	18,41	96,8	91,0	6	ND
08	-1	Leve	800	6,9	13,35	18,66	98,1	79,2	4,24	151,5
09	0	Leve	880	7,6	14,3	19,01	100	90,0	4,49	170,0
10	+1	Leve	880	7,6	15,15	18,89	99,3	93,4	4,39	204,5
11	+2	Leve	880	7,6	16,3	18,53	97,4	94,7	4,70	250,2
12	-1	Pesada	885	7,7	12,6	20,07	105,5	95,7	FC	-
12a	-1	Pesada	885	7,7	13,1	19,86	104,4	95,7	4,48	151,4
13	0	Pesada	880	7,6	14,2	19,38	101,9	95,3	4,61	228,0
14	+1	Pesada	900	7,8	15,2	19,00	99,9	95,5	6	ND
14a	+1	Pesada	880	7,6	15,6	18,83	99,0	95,2	6	ND
15	+2	Pesada	870	7,5	16,28	18,60	97,8	95,6	4,34	206,5

† Em relação ao teor em água óptimo do ensaio de compactação de referência.

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

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

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

†† FC = Furo colmatou; 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 ($I_{HET}=6$).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Influência do teor em água, w

Na Figura 4 apresentam-se os gráficos que representam a influência do *teor em água de compactação*, w , 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.

Na Figura 4 indicam-se ainda as zonas para teor em água correspondentes ao ramo seco e ao ramo húmido, da curva de compactação do ensaio de referência, e o respectivo teor em água óptimo. A análise desses gráficos permite efectuar as seguintes considerações.

(1) 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. Exceptuam-se apenas os resultados obtidos nos ensaios *10 e 15*.

a) No caso do ensaio *10*, 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 óptimo (ensaio *09*), que apresenta maior peso volúmico seco.

b) No caso do ensaio *15*, cujo provete foi obtido com energia de compactação pesada e com variação de teor em água, Δw , relativamente ao óptimo do ensaio de referência de cerca de +2%, o valor de I_{HET} é, inclusivamente, inferior ao obtido no ensaio com provete compactado com a

mesma energia de compactação com $\Delta w \approx -1\%$ (ensaio 12a).

- (2) 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. Tal situação não se verifica para provetes compactados do lado húmido da curva de compactação do ensaio de referência. Salienta-se o comportamento observado nos ensaios realizados com $\Delta w \approx +2\%$:
 - a) No provete compactado com energia de compactação “reduzida” (ensaio 07), o furo pré-formado não apresentou praticamente erosão durante o ensaio. O ensaio 07a permitiu confirmar este comportamento.
 - b) Em oposição, o ensaio 15, cujo provete foi compactado com energia pesada, apresentou erosão significativa, com I_{HET} , inclusivamente, inferior ao obtido no ensaio correspondente com energia de compactação leve.
- (3) Não foi observada uma tendência óbvia da influência do teor em água na tensão de corte crítica, em função da energia de compactação dos provetes. Porém, na zona correspondente ao ramo seco os provetes obtidos com energia de compactação pesada apresentaram maior τ_c .

5.2 I_{HET} e τ_c versus curvas de compactação

Na Figura 5 representam-se os valores de I_{HET} e de τ_c nas curvas de compactação relativas a cada energia de compactação. A análise da Figura 5 permite efectuar as principais considerações indicadas na sequência.

- (1) A máxima capacidade do solo resistir à erosão não ocorre, necessariamente, para as condições de compactação associadas ao ponto ótimo da curva de compactação de referência.
- (2) Nos provetes obtidos com igual energia de compactação, os valores máximos de I_{HET} e da tensão de corte crítica, τ_c , ocorreram para grau de saturação, S_r , superior a 90%.

- (3) Apesar de todos os provetes obtidos com energia de compactação pesada apresentarem $S_r \approx 95\%$, observa-se uma grande variabilidade nos resultados de I_{HET} e da τ_c , para diferentes relações de γ_d e w .
- (4) Nos provetes obtidos com energia de compactação leve e “reduzida”, os valores mínimos de I_{HET} e de τ_c ocorreram, em provetes compactados no respectivo ramo seco, para características de compactação associadas a menores valores de γ_d e de w .
- (5) 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.
- (6) 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.

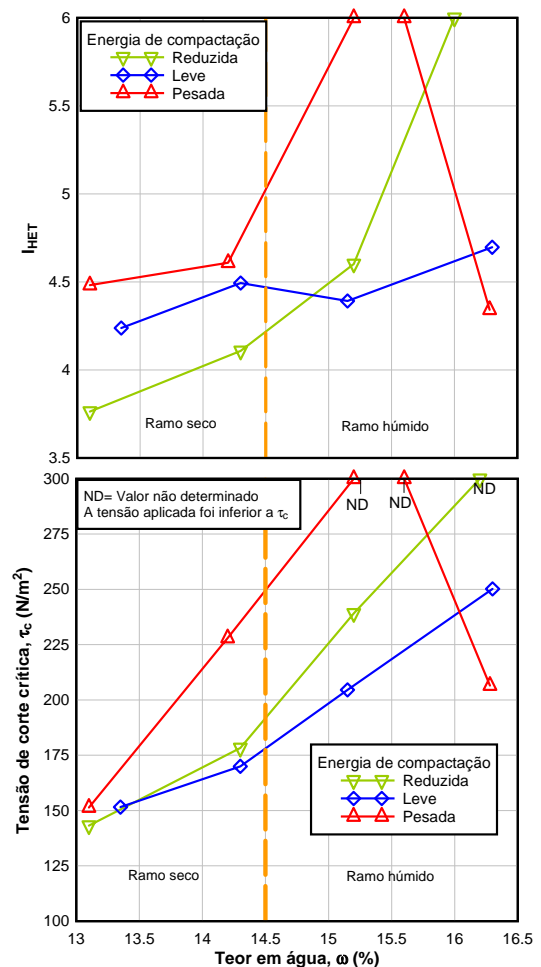


Figura 4. Influência do teor em água no I_{HET} (em cima) e na τ_c (em baixo).

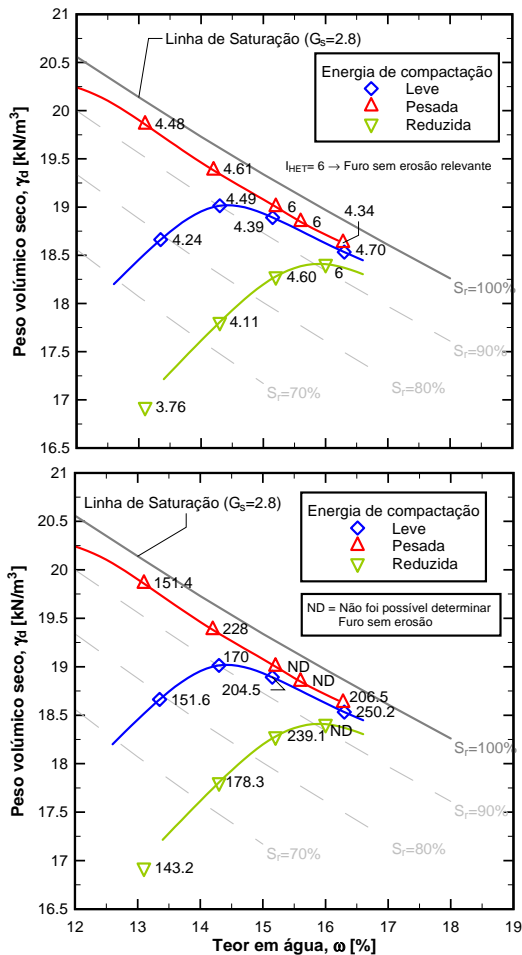


Figura 5. I_{HET} (em cima) e τ_c (N/m^2) (baixo), representados nas curvas de compactação

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi avaliada a erodibilidade, através de uma fuga concentrada (*HET*), de um solo de alteração de maciços xisto-grauváquicos, a num aterro de uma barragem, para várias condições de compactação.

Para o aterro é assumida uma curva de compactação laboratorial de referência (compactação leve em molde pequeno). Para atender a situações de campo, de sobre-compactação ou de compactação deficiente, foram também ensaiados provetes obtidos com energia de compactação específica, respectivamente, superior e inferior à curva de compactação de referência.

Foi observada uma influência relevante de w na erodibilidade do solo ensaiado. Em geral, maior teor em água de compactação está associada a maior resistência à erosão.

Refira-se que não foi ainda possível confirmar o comportamento observado no

ensaio 15, através da sua repetição. Neste ensaio, realizado com $\Delta w = +2\%$ e com energia de compactação pesada, observou-se uma reduzida resistência à erosão. Este aspecto deverá ser alvo de uma investigação cuidadosa, julgando-se, no entanto, que possa derivar de uma alteração da granulometria do material e/ou do arranjo estrutural das partículas mais finas, face à elevada energia de compactação aplicada.

REFERÊNCIAS

- Alonso, E. (2005). *Compactage et comportement de sols fins humides* *Revue Française de Géotechnique*(n°111): 33-43.
- Arulanandan, K., e Perry, E.B. (1983). *Erosion in relation to filter design criteria in earth dams*, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **109**(GT5): 682-698.
- Delgado, F., Huber, N.P., Escuder, I., e Membrillera, M.G.d. (2006). "Revised criteria for evaluating granular filters in earth and rockfill dams", *Proc., 22nd ICOLD Congress on Large Dams, Barcelona, Spain, 18-23 June, ICOLD, Vol.3*, pp. 445-456.
- Foster, M., e Fell, R. (2001). *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(5): 398-407.
- Hanson, G. (1991). *Development of a Jet Index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways.*, *Transactions of the ASAE*, **34**(5): 2015-2020.
- Maranha das Neves, E. (1989). *Analysis of crack erosion in dam cores: the crack erosion test* In 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*, PhD, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia (UNL - FCT), Lisboa, 371.
- Santos, R., e 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.
- Sherard, J.L., e Dunnigan, L.P. (1989). *Critical filters for impervious soils*, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **115**(7): 927-947.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R., e Steele, E.F. (1976). *Pinhole test for identifying dispersive soils*, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **102**(1): 69-85.
- Wan, C.F., e Fell, R. (2004). *Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(4): 373-380.
- White, F.M. (1998). *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill College.