

# **ESTUDO DA EVOLUÇÃO GRANULOMÉTRICA EM ENSAIOS EDMÉTRICOS DE ENROCAMENTO, COM CONTROLO DE SUCCÃO.**

## **STUDY OF THE EVOLUTION OF THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION FOR OEDOMETER TESTS PERFORMED ON ROCKFILL, WITH SUCTION CONTROL**

Manso, João; *LNEC, Lisboa, Portugal, jmanso@lnec.pt*  
Marcelino, João; *LNEC, Lisboa, Portugal, marcelino@lnec.pt*  
Caldeira, Laura; *LNEC, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*

### **RESUMO**

O comportamento dos materiais de enrocamento é fortemente condicionado pela resistência ao esmagamento das suas partículas. A resposta deformacional de um provete de ensaio resulta na rotura dos elementos de rocha, quando as tensões de contacto ultrapassam a resistência ao esmagamento, ou de um rearranjo das suas partículas, até se atingir um estado de equilíbrio. É sabido que certos aspetos do comportamento de enrocamento, como a compressibilidade e resistência ao corte, dependem da tensão de confinamento e que essa dependência é afetada pela quebra das partículas. Recentemente, tendo surgido um crescente interesse no estudo da influência da sucção no comportamento do material enrocamento, devido à sua importância na quebra das partículas, julga-se importante caracterizar esta influência. Para melhor quantificar a quebra de partículas, vários investigadores propuseram diferentes índices de quebra. Estes baseiam-se essencialmente nas curvas granulométricas antes e depois de cada ensaio. Para estudar o comportamento mecânico do enrocamento foram realizados ensaios no edómetro de grandes dimensões do LNEC, para diferentes trajetórias de tensões e succões. Neste artigo descreve-se a evolução dos vários índices de quebra, propostos na literatura, e adotam-se três dos principais para estudar a evolução granulométrica. No final caracteriza-se o comportamento mecânico do enrocamento e avalia-se o desempenho de cada um dos índices de quebra, sugerindo-se o mais indicado para aplicar em estudos futuros.

### **ABSTRACT**

The mechanical behaviour of rockfill is severely affected by the crushing strength of its particles. The deformational response of a specimen is directly related to the rockfill particle breakage, which occurs when the contact stresses become larger than the crushing strength, or is due to the particle rearrangement, until an equilibrium is reached. It is well known that certain aspects of rockfill behaviour, such as the deformability and shear strength, depend on the confinement stress and that influence is affected by particle breakage. Recently, a special interest has been developed in the study of the influence of suction in the mechanical behaviour of rockfill and, due to the importance of the particle breakage, it is considered important to characterise this influence. Therefore, in order to quantify the particle breakage, several researchers defined different breakage indexes. They are based essentially in the initial and final particle size distribution. Several oedometer tests were performed for different stress and suction paths in order to study the mechanical behaviour of rockfill. In the literature review the evolution of the breakage indexes is described and three of the major breakage indexes are applied to study the evolution of particle grading. The mechanical behaviour of rockfill is characterised and the performance of the breakage indexes are assessed, indicating the most suitable to apply in future studies.

## **1 - INTRODUÇÃO**

Os efeitos da construção e exploração de aterros de estruturas geotécnicas, como barragens ou vias de comunicação, podem resultar na quebra de partículas, quando a sua resistência ao esmagamento é excedida. Vários investigadores estudaram a influência que a quebra de partículas tem no comportamento do material granular: Lee e Farhoomand (1967) estudaram os efeitos da quebra de partículas na compressibilidade e deformação de solos fortemente solicitados, Zeghal (2009) focou-se no estudo do efeito do esmagamento das partículas na construção de estradas, e Okada et al. (2004) observaram que, na zona de rotura, a quebra de partículas é responsável pelo deslizamento de taludes. Como tal, pode concluir-se que a quebra de partículas influencia consideravelmente o comportamento mecânico de um enrocamento (Marsal, 1967; Xiao et al., 2014).

A quebra de partículas devido a ações de compressão ou corte modifica a distribuição granulométrica, aumentando a percentagem de material fino (Casini et al., 2004). Consequentemente, estas mudanças na granulometria e a consequente diminuição de possibilidades de rearranjo alteram a permeabilidade do material, as propriedades friccionais e correspondente estado crítico. Muitos investigadores (Hardin, 1985; McDowell et al., 1996; Ma et al., 2014) estudaram experimentalmente o papel da quebra das partículas (em câmaras triaxiais de grandes dimensões, ensaios multi-eixo e ensaios triaxiais verdadeiros) no comportamento mecânico do material caracterizando a influência da quebra de partículas na resistência ao corte de enrocamento (Marsal, 1967; Gupta, 2009). Para avaliar quantitativamente a quebra de partículas para diversas solicitações, vários investigadores propuseram diferentes índices de quebra baseados nas curvas granulométricas antes e depois de ensaio (Lee e Farhoomand, 1967; Marsal, 1967; Hardin, 1985; Lade et al., 1996; Xiao et al., 2014). Miura e O-Hara (1979) definiram o índice de quebra durante os processos de consolidação e corte, de ensaios triaxiais, utilizando os acréscimos de teor em finos (75 mm ou inferior). Para isso foi tido em consideração o aumento da superfície das partículas para quantificar o grau de quebra de partículas durante o carregamento do material. Por seu lado, Einav (2007) definiu um índice de quebra de partículas relativo, baseado na teoria dos fractais e, baseando-se nesse trabalho, Wood e Maeda (2008) propuseram um índice de estado de granulometria para quantificar a quebra de partículas. Subsequentemente, alguns investigadores desenvolveram modelos elastoplásticos (Daouadji e Hicher, 2009), modelos de superfícies limite (Gamboa, 2011), e modelos conceptuais de estado alterados (Varadarajan et al., 2006) que incorporavam o índice de quebra de modo a descrever o comportamento tensão-deformação de geomateriais.

## 2 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 - Caracterização do material

Neste trabalho foram considerados aspetos importantes com a esfericidade, densidade aparente, porosidade aparente, tamanho e formas das partículas de enrocamento, estado de alteração do material, teor em água máximo e teor em água natural, índice de vazios e fraturação intra-granular. O material ensaiado consistiu num granito utilizado na construção da barragem de Montesinho, que se localiza no Parque Natural de Montesinho, com uma densidade aparente entre 2400 e 2540 kg/m<sup>3</sup> e uma porosidade aparente de 2,4. Os tamanhos das partículas ensaiadas variaram entre 9,5 e 50,4 mm, divididos em quatro intervalos: 9,5 – 19,1, 19,1 – 25,4, 25,4 – 38,1 e 38,1 – 50,4 mm, com valores de esfericidade entre 0,72 e 0,97, 0,63 e 0,92, 0,66 e 0,96, 0,71 e 0,97, respetivamente. A esfericidade determina-se pelo rácio entre a área superficial da partícula e a área da menor esfera circunscrita. Neste trabalho esta relação foi aproximada por  $\Psi = (bc/a^2)^{1/3}$ , em que  $a$ ,  $b$  e  $c$  correspondem à maior, intermédia e menores dimensões de cada partícula, respetivamente. O material apresentava um estado de alteração  $W_{2-3}$ , com teor em água natural entre 0,24 e 0,28 %, e um teor em água máximo de aproximadamente 1,0 %.

As partículas de enrocamento de maior dimensão aplicadas na construção da barragem de Montesinho tornavam impossível o ensaio da granulometria aplicada *in situ*, sendo esta uma questão frequente em ensaios de enrocamento. Sendo assim, os ensaios foram realizados sobre uma granulometria com as dimensões das partículas ajustadas, admitindo que estas curvas continuavam a reproduzir o comportamento do material real. Este ajustamento consistiu em substituir as frações de maiores dimensões, cujos tamanhos são superiores ao permitido no ensaio, por material com menores dimensões. Este método é conhecido por truncagem e substituição (Zeller e Wullimann, 1957). Adotando um rácio de 10 vezes entre o diâmetro do edómetro (500 mm) e a maior dimensão das partículas, a maior dimensão considerada foi de aproximadamente 50,8 mm (2"). Tendo em consideração a deformação de um material granular, o efeito de escala apenas afeta a quebra das partículas (Marachi et al., 1969; Ortega, 2008). Marachi et al. (1969) mostraram que a deformação devido ao deslizamento entre partículas não é influenciada por efeitos de escala. Assim, o efeito de escala deve ser tido em consideração quando o esmagamento de partículas representa uma parte importante do mecanismo de deformação, sendo que é difícil quantificar uma vez que os dois mecanismos principais (esmagamento e deslizamento de partículas) dissipam energia. De modo a incluir a influência do esmagamento das partículas, é necessário determinar a quantidade de energia dissipada por cada mecanismo, que diferem para diferentes materiais (Ortega, 2008).

O enrocamento ensaiado foi obtido numa mancha de empréstimo localizada na margem esquerda do reservatório. Foi extraído por métodos de escavação mecânicos de modo a obter um enrocamento bem graduado, com uma dimensão máxima de 800 mm. Depois da extração, o material foi sujeito a um processo de esmagamento mecânico, eliminando a maior parte das imperfeições originadas no processo de escavação. O material foi guardado em pilhas para ser posteriormente aplicado *in situ*. O material de enrocamento usado nestes ensaios foi obtido a partir destes depósitos, tendo sido separado (para facilitar

o seu manuseamento) em quatro diferentes gamas de dimensões, com base nos peneiros ASTM: 9,5 a 19,1 mm (3/8" a 3/4"), 19,1 a 25,4 mm (3/4" a 1"), 25,4 a 38,1 mm (1" a 1,5") e 38,1 a 50,8 mm (1,5" a 2"). Tendo em conta as condições referidas, a granulometria adotada para os ensaios edométricos apresenta-se na Figura 1, com um  $C_u = 9,2$  e um  $C_c = 2,7$ .

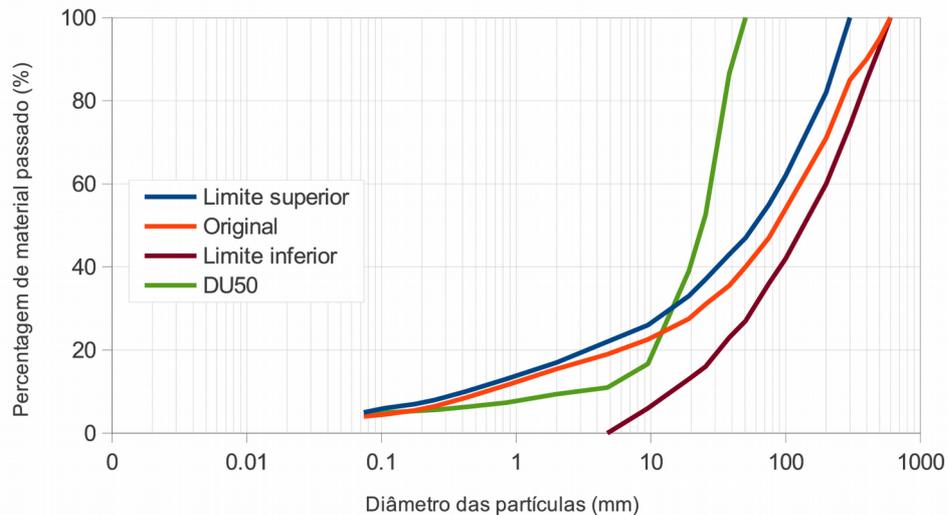


Figura 1 - Curva granulométrica

## 2.2 - Ensaios realizados

O principal objetivo da realização dos ensaios edométricos foi estudar o efeito da sucção na compressibilidade do enrocamento, como tal, foram adotadas diferentes trajetórias de sucção. Através do preenchimento dos poros de enrocamento com uma uma humidade relativa imposta, vários investigadores (Oldecop e Alonso, 2003; Chávez, 2004) mostraram que este parâmetro controla a deformabilidade de materiais granulares grosseiros. Esses ensaios mostraram ainda a existência de uma relação direta entre o fenómeno de colapso e a sucção total. A relação entre a sucção total,  $\psi$ , e a humidade relativa ( $HR$ ) pode ser obtida considerando a equação de Kelvin (Fredlund e Rahardjo, 1993):

$$\psi = \frac{-R \cdot T}{M_w (1/\rho_w)} \cdot \ln(HR) \quad [1]$$

onde  $R$  representa a constante universal dos gases perfeitos (8,31432 J/mol.K),  $T$  é a temperatura absoluta medida em graus Kelvin,  $M_w$  é a massa molecular da água (18,016 kg/kmol),  $\rho_w$  é a massa volúmica da água expressa em  $kg/m^3$  em função de  $T$ .  $HR$  pode ser definida com a pressão parcial do vapor de água dividida pela pressão de saturação do vapor de água sobre uma superfície plana de água à mesma temperatura. Com base no trabalho de Oldecop e Alonso (2003) (Figura 2), as principais características dos ensaios foram definidas e apresentam-se na Figura 3 e na Tabela 1.

Tabela 1 - Ensaios edométricos realizados com uma taxa de deformação axial de 0,14 mm/s

| Referência | Trajectoria de humidade relativa |
|------------|----------------------------------|
| DU50.1     | 50 %                             |
| DU50.2     | 75 %                             |
| DU50.3     | 100 % (material submerso)        |

Baseando-se em observações feitas experimentalmente, Oldecop e Alonso (2001) sugeriram que o comportamento mecânico de enrocamento é apenas influenciado significativamente pela água retida nos poros da rocha. A água contida nos vazios de grandes dimensões formados pelos espaços inter-particulares não devem ter nenhum efeito no comportamento mecânico. Neste trabalho admitiu-se

que a inundação do provete correspondia a aplicar uma sucção nula, implicando a saturação das partículas de rocha (Oldecop e Alonso, 2004). Ao mesmo tempo, algumas das metodologias que se pretendiam implementar no procedimento experimental foram testadas, nomeadamente, as camadas de proteção no topo e base do provete e o sistema de circuito de ar fechado para aplicação controlada de sucções, utilizando soluções de sais sobressaturadas.

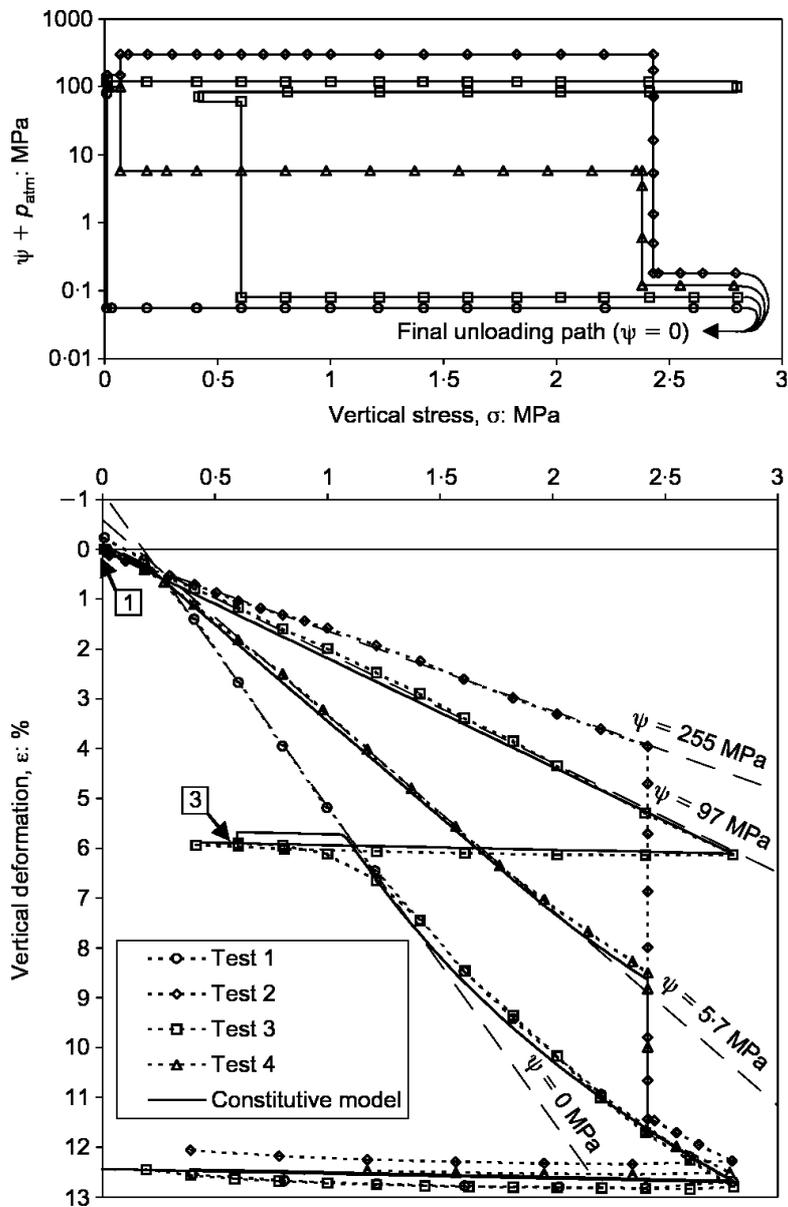


Figura 2 – Ensaio edométricos realizados por Oldecop e Alonso (2003).

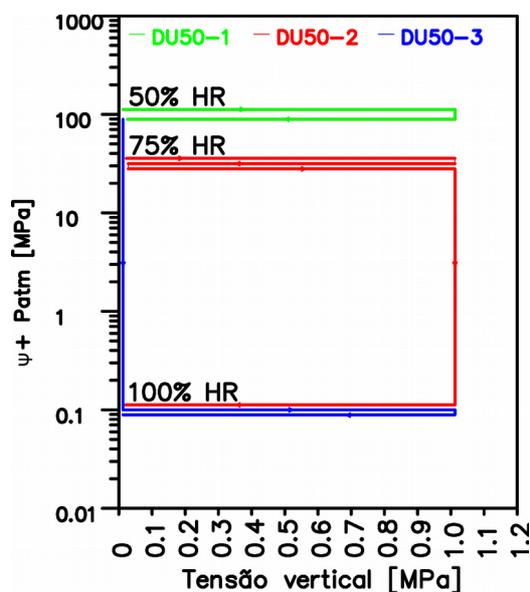


Figura 3 – Trajetórias de tensão vertical-sucção total adotadas nos ensaios DU50.1, DU50.2 e DU50.3.

As camadas de proteção foram adotadas para prevenir um esmagamento excessivo das partículas localizadas no topo e na base do provete, em contacto com placas de aço. Quando o material é ensaiado com estas camadas de proteção ocorre uma melhor distribuição de forças nas partículas localizadas nas extremidades do provete. Essas camadas de proteção são constituídas pelo mesmo material, com dimensões de partícula entre 9,5 e 12,7 mm. A quantidade de material deve ser a adequada para preencher os vazios entre o enrocamento e as placas, sem introduzir um aumento artificial da altura do provete. O material das camadas de proteção não deve interferir com os contactos entre o enrocamento e as placas, tanto quanto possível. A camada de proteção deve ser distribuída uniformemente sobre a placa inferior, antes da primeira camada de material ser colocada. Na placa superior, o material deve ser colocado manualmente, de maneira a preencher os vazios criados entre as partículas de enrocamento e de forma a garantir uma superfície o mais plana possível. O material utilizado nas camadas de proteção devem ser o mais resistente possível para evitar a quebra das suas partículas. Deste modo, assumindo que o material das camadas de proteção não parte, é possível retirar a sua massa diretamente da curva granulométrica após ensaio.

O sistema de aquisição de dados, desenvolvido para o edómetro de grandes dimensões (DU50), permitiu caracterizar adequadamente o comportamento dependente do tempo do enrocamento ensaiado. O sistema registava os deslocamentos obtidos através de carga constante e de sucções constantes ou variáveis. Para cada incremento de carga ou sucção a sua taxa de aquisição variava, dependendo dos parâmetros de configuração. Definiram-se três parâmetros no início de cada ensaio: intervalo de tempo, variação da força axial e variação do deslocamento vertical. Os valores definidos foram 60 segundos, 0,50 kN e 0,10 mm, respetivamente. Durante o ensaio, sempre que um destes valores fosse excedido, o sistema guardava uma nova leitura. Estes parâmetros foram definidos de modo a ativar o sistema sempre que fossem impostas alterações significativas de forças ou deslocamentos. Caso não se verificassem, após um minuto o sistema guardava uma leitura. Esta metodologia teve como objetivo diminuir os custos computacionais de guardar e processar quantidades consideráveis de leituras.

A fase inicial do ensaio DU50.1 consistiu em permitir que o material atingisse o equilíbrio com uma humidade relativa de 50 %, através da utilização de um sistema de circulação de ar fechado no interior do provete. Esse equilíbrio era atingido quando uma determinada solução sobressaturada atingia peso constante e as diferenças entre humidade relativa à entrada e à saída do provete eram desprezáveis. A humidade relativa de 50 % foi atingida com a utilização de uma solução sobressaturada de  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  (HR = 51 % a 25° C). Após este período inicial, a tensão vertical foi aumentada até 1,0 MPa, com incrementos de 100 kPa em patamares de 24 horas, para humidade relativa constante. Depois do período de carga, o provete foi descarregado. O principal objetivo deste ensaio foi, em primeiro lugar, implementar o sistema de controlo de sucção e, em segundo lugar, estudar a compressibilidade do material a uma humidade relativa de 50 %, permitindo comparar este comportamento com os restantes ensaios.

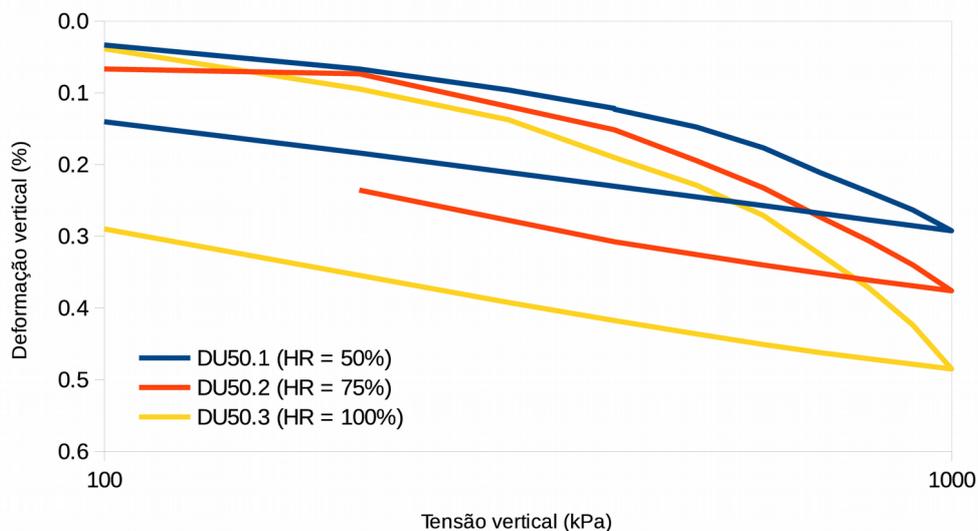
A fase inicial do ensaio DU50.2 consistiu em aplicar uma sucção controlada com uma solução sobressaturada de  $NaCl$  (HR = 75 % a 25° C), até o sistema estar em equilíbrio. O ensaio consistiu num ciclo de carga/descarga até 1 MPa e recarga novamente até 1 MPa. Neste patamar, a carga foi mantida constante e o provete foi inundado (equivalente a HR=100%), medindo as deformações obtidas. Depois do provete estar em equilíbrio foi descarregado. Na primeira parte do ensaio pretendeu-se quantificar a

expansibilidade do material a uma humidade relativa de 75 % e, na segunda parte, o objetivo foi analisar as diferenças no comportamento do material em relação a diferentes valores de sucção.

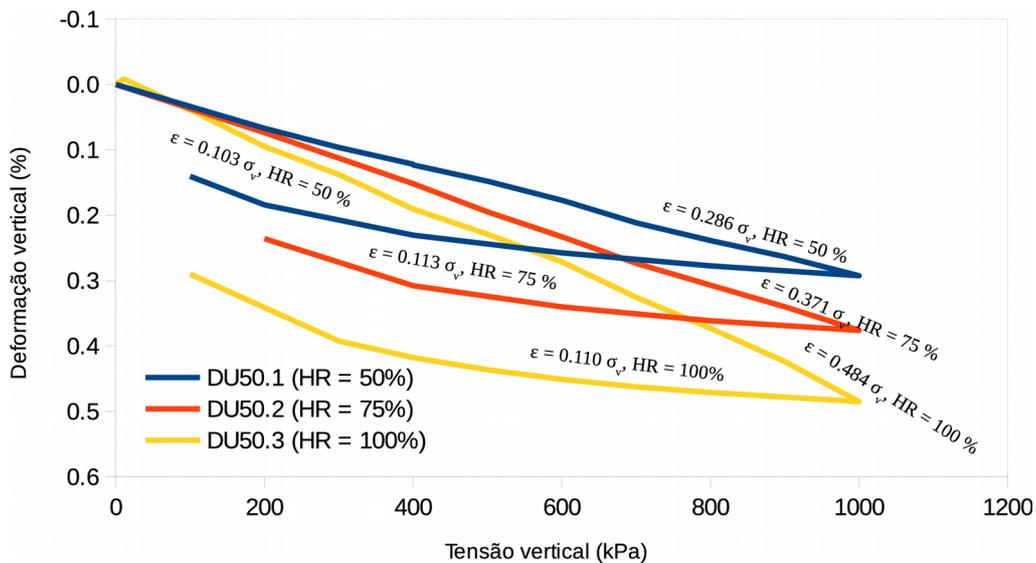
No ensaio DU50.3 o provete foi inundado, sem deixar aumentar a carga vertical, e registaram-se as deformações verticais durante um período de 8 horas. Em seguida realizou-se um ciclo de carga/descarga, adotando a mesma metodologia do ensaio DU50.1. Permitindo comparar as compressibilidades para as várias humidades relativas estudadas.

### 2.3 - Análise de resultados

A Figura 4 apresenta a compressibilidade do enrocamento obtida nos ensaios DU50.1, DU50.2 e DU50.3. A tensão vertical apresenta-se em escala logarítmica (Figura 4a) e escala natural (Figura 4b). Pode observar-se que à medida que a sucção diminui a compressibilidade aumenta. Naturalmente, o provete que foi inicialmente inundado (DU50.3) apresentou a maior compressibilidade, quando comparado com os restantes ensaios. Na Figura 4b) apresentam-se ainda relações lineares que foram ajustadas aos resultados obtidos.



a)



b)

Figura 4 - Compressibilidade do enrocamento para diferentes trajetórias de tensão e sucção: a) tensão vertical em escala logarítmica, b) tensão vertical em escala natural.

O ensaio DU50.2 (HR = 75 %) foi dividido em duas partes. A primeira correspondeu a uma trajetória de carga/descarga e a segunda consistiu em recarregar o provete e, seguidamente, inundá-lo. O esquema de carregamento foi dividido em incrementos de 100 kPa, até 1 MPa, com patamares de 24 horas, enquanto que as trajetórias de descarga e recarga foram divididas em incrementos de 200 kPa.

A Figura 5 compara as trajetórias de carga/recarga dos ensaios DU50.2 (HR = 75 %) e DU50.3 (HR = 100 %). Foi interessante observar que as deformações verticais, depois da inundação da câmara no ensaio DU50.2, foram da mesma ordem de grandeza das deformações do ensaio DU50.3. Este aspeto caracteriza a influência que a sucção tem na compressibilidade do enrocamento.

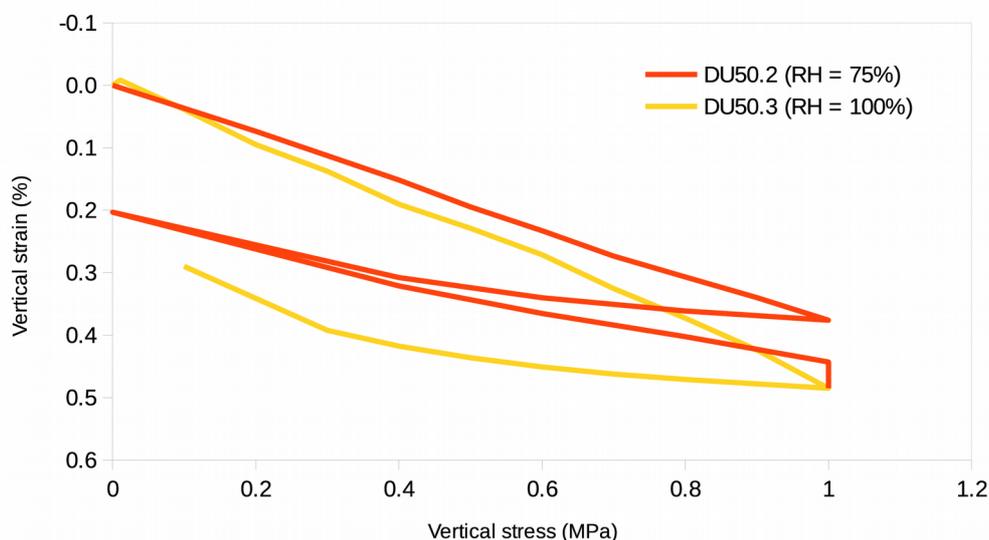


Figura 5 – Compressibilidade do enrocamento para diferentes trajetórias de tensão e sucção.

### 3 - ANÁLISE DA QUEBRA DAS PARTÍCULAS

Depois de realizar os ensaios edométricos o material foi seco e determinaram-se as granulometrias após ensaio (Figura 6). Isto permitiu analisar a quebra das partículas devido às trajetórias de tensão e sucção adotadas. Para quantificar este efeito foram determinados vários índices de quebra. O primeiro foi proposto por Marsal (1967) e define-se como  $B_g$  (Figura 7). O autor desenvolveu este índice depois de ensaiar algumas partículas de enrocamento em câmaras triaxiais de grandes dimensões, considerando a variação granulométrica antes e após ensaio. Depois de calcular a diferença em percentagem do material retido em cada peneiro, o índice  $B_g$  pode ser determinado pela soma dos valores positivos obtidos, expressos em percentagem. O índice varia entre 0, em que não existe quebra alguma, e 1 (100 %), indicando que todas as partículas quebram para dimensões inferiores ao menor peneiro utilizado. O segundo índice foi definido por Lee and Farhoomand (1967) e representa-se por  $B_{15}$  (Figura 7). Foi definido enquanto estes investigadores estudavam materiais de filtros de barragens de aterro. Uma vez que estavam preocupados em estudar os efeitos que a quebra de partículas tinha na obstrução de filtros de barragens de aterro, este índice expressa a variação de uma dimensão apenas ( $D_{15}$ ), que é importante para o dimensionamento de filtros. Mais tarde, Hardin (1985) propôs um índice de quebra diferente dos anteriores, que definiu por  $B_r$  (Figura 7). Com base nas granulometrias do material antes e após ensaio, definiu duas quantidades distintas para determinar este índice: um potencial de quebra ( $B_p$ ), baseado numa curva granulométrica última (com um valor de corte arbitrário de 0,074 mm de tamanho de partícula), e a quebra total ( $B_t$ ). O índice  $B_r$  é determinado pela quebra relativa ( $B_t/B_p$ ). Finalmente, Einav (2007) definiu um índice diferente que também representou por  $B_r$  (Figura 8). Para os diferenciar serão respetivamente representados por  $B_r^H$  e  $B_r^E$ , tendo em conta as iniciais de cada autor. Einav adotou a mesma metodologia de Hardin e o índice é determinado pela quebra relativa. Porém, na determinação da curva granulométrica última adotou a ideia que a curva granulométrica tende a ser fractal. Apesar de ainda não existir consenso sobre qual a forma exata da curva de distribuição última, para a maior parte dos casos práticos aceita-se uma dimensão fractal de 2,5-2,6 (Einav, 2007).

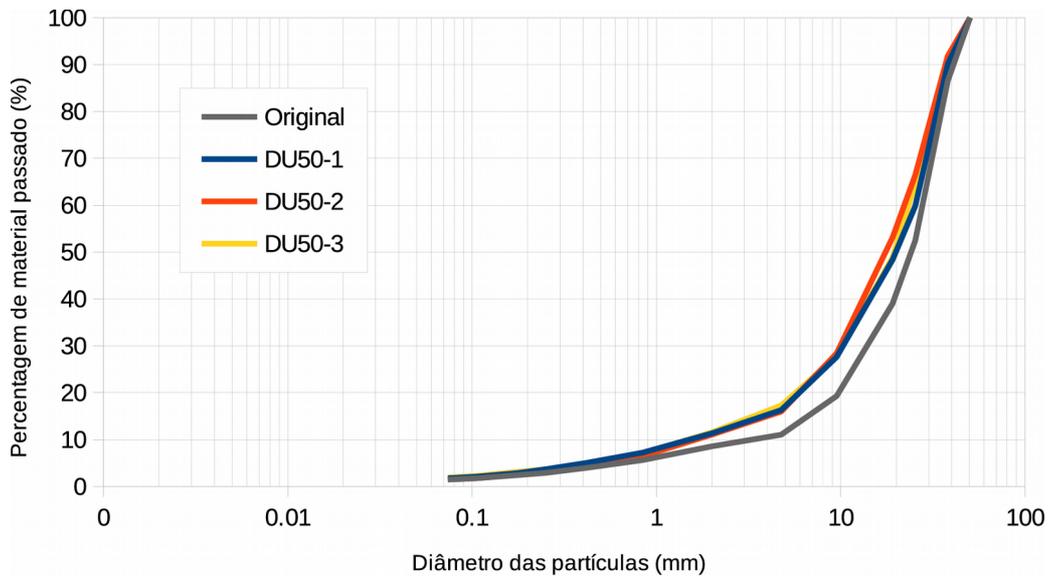


Figura 6 – Granulometrias antes e após realização dos ensaios edométricos.

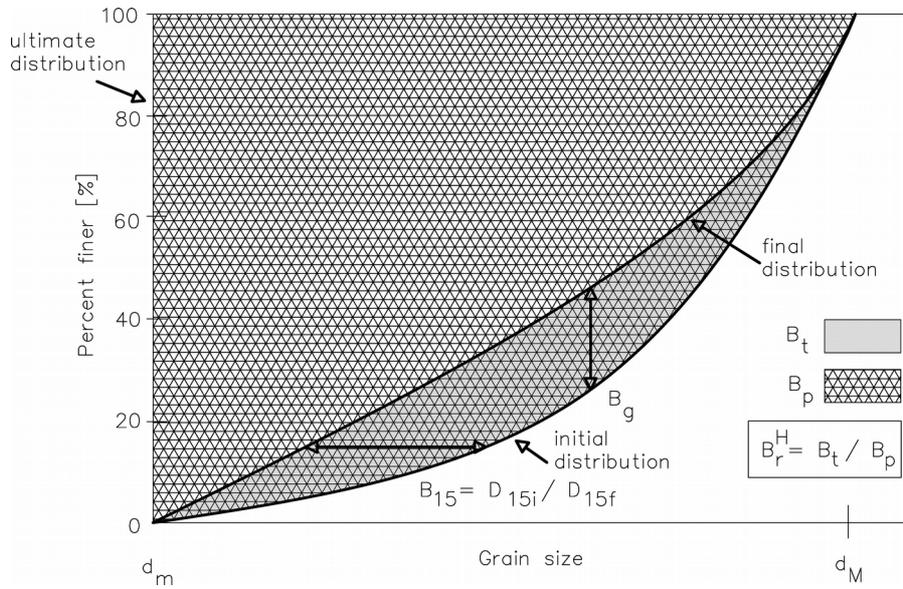


Figura 7 – Definição esquemática dos índices de quebra de Marsal, Lee e Farhoomand e Hardin.

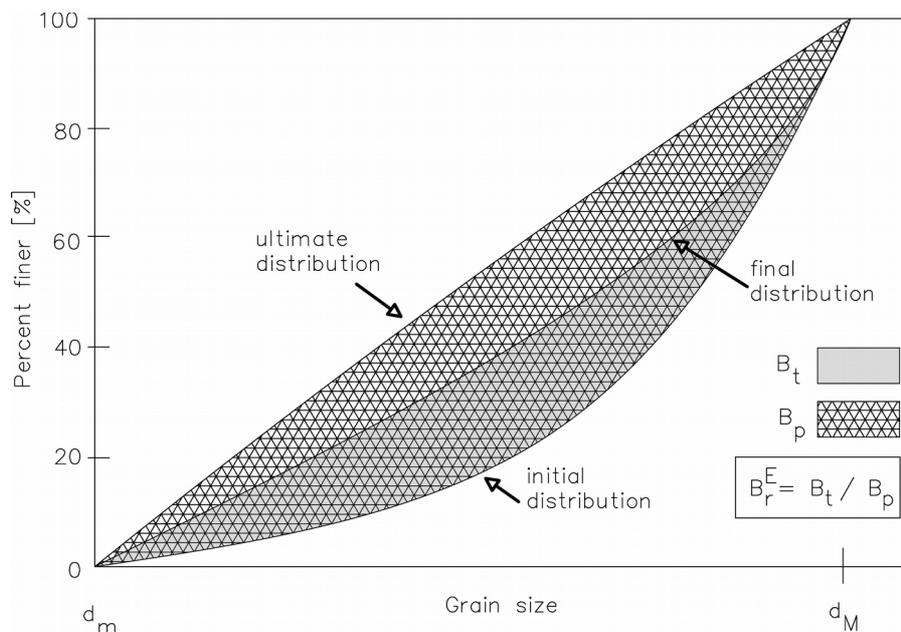


Figura 8 – Definição esquemática do índice de quebra de Einav (2007).

Os resultados apresentam-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Índices de quebra obtidos nos ensaios edométricos

| Índices de quebra | HR [%] | $B_g$ [%] | $B_{15}$ | $B_r^H$ [%] | $B_r^E$ [%] | Obs.                   |
|-------------------|--------|-----------|----------|-------------|-------------|------------------------|
| DU50.1            | 50     | 14        | 1,67     | 17          | 46          | Não inundado           |
| DU50.2            | 75     | 12        | 1,92     | 15          | 40          | Recarregado e inundado |
| DU50.3            | 100    | 9         | 1,74     | 12          | 31          | Inundado               |

Tendo em consideração as trajetórias de tensão e sucção adotadas em cada ensaio e as granulometrias apresentadas na Figura 6 não foi claro qual o ensaio que apresentou a maior quantidade de quebra de partículas. Considerando os índices de quebra de Marsal, Hardin e Einav foi o ensaio DU50.1, enquanto que considerando o índice de Lee e Farhoomand foi o ensaio DU50.2 que obteve o maior valor. Tendo em conta os resultados obtidos neste trabalho e os resultados experimentais e observações feitas por outros investigadores (Marsal, 1967; Veiga Pinto, 1983; Oldecop, 2000; Chávez, 2004; Ortega, 2008), era expectável que o provete inundado apresentasse a maior quebra de partículas, quando comparado com provetes em condições não saturadas, mas adotando a mesma trajetória de tensões. Como tal, a maior quebra de partículas no ensaio DU50.3, em relação ao ensaio DU50.1, pode ser explicada pela inundação. Este aspeto mostra claramente o efeito da sucção no comportamento do material. Porém, estas conclusões nem sempre foram refletidas nos valores dos índices de quebra. Apenas um índice seguiu a referida sequência (DU50.2, DU50.3 e DU50.1), que foi o índice de Lee e Farhoomand,  $B_{15}$ . Além deste aspeto, os restantes três índices obtiveram o máximo valor para o ensaio DU50.1. Tendo em conta estes resultados pode concluir-se que as ferramentas utilizadas para quantificar a quebra de partículas não têm a sensibilidade necessária para caracterizar corretamente o enrocamento estudado. Apenas um índice de quebra foi capaz de captar as diferenças que ocorreram no material para as diferentes trajetórias de tensão e sucção. Porém, julga-se necessário realizar mais ensaios e modelos numéricos para melhor aferir o desempenho de cada índice de quebra.

Pode-se concluir que a definição dos índices de quebra de Hardin e Einav apresentam certas semelhanças. Nas suas definições a maior diferença prende-se com a determinação da curva granulométrica última. No índice de Hardin assumiu-se um limite aleatório de corte para dimensões de partículas de 0,074 mm, o que implica que todas as partículas irão eventualmente partir e no final possuir dimensões inferiores a este valor. Porém, isto não está de acordo com o nível de conhecimento atual em que se julga que a curva granulométrica tende a ser fractal (McDowell e Bolton, 1998). É geralmente aceite que as menores partículas tendem a ter maior probabilidade de quebra que as maiores. Este aspeto deve-se ao facto das maiores partículas terem mais pontos de contacto, devido a um maior número de partículas circundantes, originando uma maior distribuição de forças. Tendo isto em consideração, Einav propôs um ajuste à definição original do índice de quebra de Hardin. Neste índice ele

adotou uma curva granulométrica última baseada no modelo fractal. Devido a estas semelhanças, os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que o índice de Einav apresenta uma relação de cerca de 2.7 com o índice de Hardin. Como tal, uma vez que ambos definem uma quebra relativa das curvas granulométricas, aconselha-se à adoção do índice de Einav em análises futuras.

## 4 - CONCLUSÕES

O comportamento mecânico do enrocamento é fortemente condicionado pela resistência ao esmagamento das suas partículas. A deformabilidade do material resulta de dois aspetos fundamentais: quebra das suas partículas, quando as tensões de contacto ultrapassam a resistência ao esmagamento, e o seu rearranjo, até se atingir um estado de equilíbrio. Neste trabalho são apresentados 3 ensaios edométricos de grandes dimensões onde se estudou o efeito da sucção no comportamento mecânico do material. Mostrou-se de forma clara o efeito que esta variável tem na deformabilidade e os assentamentos que origina quando o material é submerso.

Um dos objetivos principais deste trabalho era estudar e quantificar a evolução granulométrica que ocorria nos ensaios. Para realizar essa análise foram determinados os índices de quebra. Tendo em conta os resultados obtidos, o índice de Lee e Farhoomand foi o que apresentou melhores resultados. De qualquer maneira para melhor aferir o desempenho dos vários índices concluiu-se ser necessário realizar mais ensaios sobre o material utilizado neste trabalho e repetir os ensaios, para outro tipo de material.

Dadas as semelhanças entre os índices de quebra de Hardin e Einav, quer em termos de definição, quer em termos de resultados, aconselha-se à adoção do índice de Einav em análises futuras.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos colegas Amílcar Gonçalves e Joaquim Timóteo toda a assistência e disponibilidade que ofereceram na realização dos ensaios apresentados neste trabalho. Gostariam ainda de agradecer à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento através de uma Bolsa de Doutoramento (SFRH/BD/121461/2016).

## REFERÊNCIAS

- Biarez, J. e Hicher, P. (1994) – Elementary mechanics of soil behaviour. Rotterdam A.A. Balkema.
- Casini, F., Viggiani, G. M. B. e Springman, S. M. (2013) – Breakage of an artificial crushable material under loading. *Granular Matter*, vol. 15, issue 5, pp. 661–673.
- Chávez Negrete, C. (2004) – Estudio del comportamiento triaxial de materiales granulares de tamaño medio con énfasis en la influencia de la succión. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Daouadji, A. e Hicher, P. (2009) - An enhanced constitutive model for crushable granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 34, issue 6, pp. 555–580.
- Einav, I. (2007) - Breakage mechanics - Part I: Theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 55, issue 6, pp. 1274–1297.
- Fredlund, D. e Rahardjo, H. (1993) – Soil mechanics for unsaturated soils. *Wiley*, New York.
- Gamboa, C. (2011) – Mechanical behaviour of rockfill materials application to concrete face rockfill dams. PhD thesis, École Centrale de Paris.
- Gupta, A. K. (2009) – Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 14, issue H.
- Hardin, B. O. (1985) – Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical and Engineering, ASCE*, vol. 111, issue 10, pp. 1177–1192.
- Lade, P., Yamamuro, J. e Bopp, P. (1996) – Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, issue 4, pp. 309–316.

- Lee, K. e Farhoomand, I. (1967) – Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 4, issue 1, pp. 68-86.
- Ma, G., Zhou, W., e Chang, X. L. (2014) – Modeling the particle breakage of rockfill materials with the cohesive crack model. *Computers and Geotechnics*, vol. 61, pp. 1320-1143.
- Marachi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B., e Duncan, J. M. (1969) – Strength and deformation characteristics of rockfill materials. Technical report, *University of California*, Berkeley, CA, Report TE-69-5.
- McDowell, G. R., Bolton, M. D. e Robertson, D. (1996) – The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 44, issue 12, pp. 2079-2102.
- McDowell, G. e Bolton, M. D. (1998) – On the micromechanics of crushable aggregates. *Geotechnique*, vol. 48, issue 5, pp. 667-679.
- Miura, N. e O-Hara, S. (1979) – Particle-crushing of a decomposed granite soil under shear stresses. *Soils and Foundations*, vol. 19, issue 3, pp. 1-14.
- Okada, Y., Sassa, K. e Fukuoka, H. (2004) – Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests. *Engineering Geology*, vol. 75, issue 3-4, pp. 325-343.
- Oldecop, L. A. (2000) – Compresibilidad de Escolleras - Influencia de la Humedad. Phd Thesis, *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Oldecop, L. A. e Alonso, E. E. (2001) – A model for rockfill compressibility. *Géotechnique*, vol. 51, issue 2, pp. 127-139.
- Oldecop, L. A. e Alonso, E. E. (2003) – Suction effects on rockfill compressibility. *Géotechnique*, vol. 53, issue 2, pp. 289-292.
- Oldecop, L. A. e Alonso, E. E. (2004) – Testing rockfill under relative humidity control. *ASTM geotechnical testing journal*, vol. 27, issue 3, pp. 269-278.
- Ortega, E. (2008) – Comportamiento de materiales granulares gruesos. Efecto de la succión. PhD Thesis, *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- R. J. Marsal. Large-Scale Testing of Rockfill Materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 93, issue 2, pp. 27-43.
- Varadarajan, A., Sharma, K., Abbas, S., e Dhawan, A. (2006) – Constitutive Model for Rockfill Materials and Determination of Material Constants. *International Journal of Geomechanics*, vol. 6, issue 4, pp. 226-237.
- Veiga Pinto, A. (1983) - Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento. PhD thesis, *LNEC*.
- Wood, D. M. e Maeda, K. (2008) – Changing grading of soil: Effect on critical states. *Acta Geotechnica*, vol. 3, issue 1, pp. 3-14.
- Xiao, Y., Liu, H., Chen, Y. e Jiang, J. (2014) - Strength and Deformation of Rockfill Material Based on Large-Scale Triaxial Compression Tests.II: Influence of Particle Breakage. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140, issue 12.
- Zeller, J., e Wullimann, R. (1957) – The shear strength of the shell materials for the Go-Schenenalp Dam, Switzerland. *In 4th Inst. J. on SMFE*, pp. 399-404, London, UK.
- Zeghal, M. (2009) – The impact of grain crushing on road performance. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 27, issue 4, pp.549-558.