

ESTUDO DA FLUÊNCIA E DA RELAXAÇÃO DE ENROCAMENTOS EM ENSAIOS EDOMÉTRICOS

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

Neste trabalho estuda-se experimentalmente a fluência e a relaxação de enrocamento submetido a diversos níveis de carga. Uma série de ensaios de relaxação foram realizados num enrocamento para incrementos de 100 kPa até 1MPa, com patamares de 24 horas. Um dos objetivos deste trabalho foi estudar a evolução granulométrica, durante os ensaios, e observar as diferenças entre os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c). Numa segunda fase do trabalho o objetivo foi estudar o efeito do tamanho das partículas no comportamento do material, utilizando uma granulometria uniforme. Em cada ensaio foram observados dois tipos de deformações, sugerindo que a deformação pode ser dividida em componente instantânea e um comportamento dependente do tempo.

ABSTRACT

The behaviour of a typical rockfill during creep and stress relaxation is studied experimentally. A series of stress relaxation tests were performed after the assembly was axially loaded in increments of 100 kPa, up to 1 Mpa, using steps of 24 hours. One of the objectives of this work was to study the grading evolution, during tests, and observe the differences between the sample's uniformity coefficient (C_u) and coefficient of curvature (C_c). In a second phase of the work the aim was to study the effect of the particle size on the material behaviour, using a parallel gradation curve. In each test, two types of deformations were observed, suggesting that the strain may be divided into a component of instantaneous strain and time-deferred strain.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, foram realizados vários trabalhos sobre materiais granulares, incluindo enrocamento, em que se observou que a compressão e a deformação estão diretamente relacionada com a quebra de partículas (Marsal, 1967, Veiga Pinto, 1983, Oldecop, 2000, Chávez, 2004, Ortega, 2008, Gamboa, 2011).

A granulometria dos materiais desempenha um papel importante no comportamento das estruturas geotécnicas, desde o período de construção (Ortega, 2008, Gamboa, 2011) e ao longo da sua vida. Um material bem graduado contém partículas de várias dimensões e a compactação deste material origina uma estrutura compacta, com o baixo índice de vazios e muitos pontos de contacto entre partículas. Por outro lado, materiais mal graduados incluem partículas com a mesma gama de dimensões e quando são compactados obtém-se uma estrutura com índice de vazios elevado e poucos pontos de contacto entre partículas. Daí resulta uma grande concentração de

tensões nos pontos de contacto, originando uma maior quebra de partículas e, inevitavelmente, estruturas mais deformáveis.

Oldecop and Alonso (2001) estudaram os fenómenos de colapso por molhagem e o efeito da água na compressibilidade de enrocamento, desenvolvendo para isso um edómetro de grandes dimensões. Durante os seus ensaios observaram que, para estados de tensão moderados, a resposta macroscópica do material dividia-se em duas fases: um mecanismo de deformação instantânea, designada de rearranjo de partículas, e, à medida que as tensões aumentavam, ocorriam dois mecanismos de deformação, um instantâneo e um dependente do tempo.

O objetivo deste trabalho é estudar experimentalmente a fluência e a relaxação de enrocamento considerando, entre outros aspetos, o efeito do tamanho das partículas.

2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O programa experimental incluiu dois ensaios edométricos, um realizado com uma granulometria contínua, que será designado DU50.CG, e outro com uma granulometria uniforme, que será designado DU50.PG, cujas distribuições granulométricas se apresentam na Figura 1. O edómetro usado nos ensaios tem uma altura de 0,474 m e um diâmetro de 0,5 m.

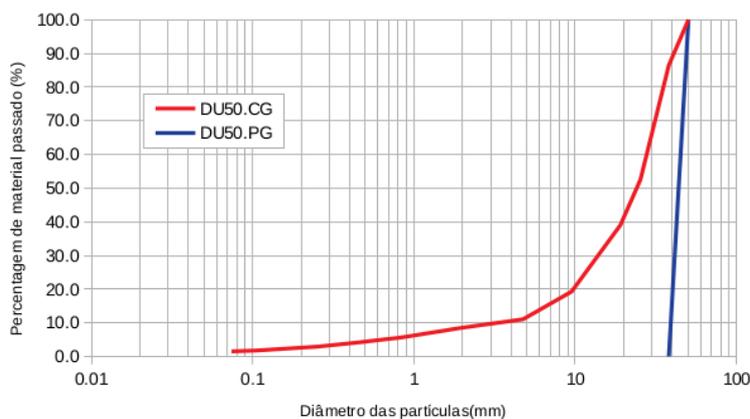


Figura 1 - Granulometrias ensaiadas nos ensaios edométricos

O sistema de aquisição de dados, desenvolvido para o edómetro DU50, permitiu caracterizar adequadamente o comportamento dependente do tempo do enrocamento estudado. O sistema registou os deslocamentos obtidos durante os vários patamares de carga e era ativado, mantendo a carga, sempre que ocorria uma relaxação das tensões. A taxa de aquisição de dados variava consoante os parâmetros de configuração. Os critérios de aquisição baseiam-se em três parâmetros: intervalo de tempo, variação de força axial e variação de deslocamento vertical, cujos valores eram 60 segundos, 0,50 kN e 0,10 mm, respetivamente. Durante os ensaios, sempre que algum destes valores era ultrapassado, o sistema de aquisição registava uma leitura. Esta metodologia permitiu a obtenção de registos completos para cada ensaios reduzindo de forma substancial o volume de dados desnecessários.

3. TRAJETÓRIAS DE TENSÃO

Para os dois ensaios adotou-se a mesma trajetória de tensão. Os provetes foram inicialmente inundados, durante a aplicação de uma tensão residual, cujo objetivo era aumentar o contacto entre os anéis de borracha e os anéis de alumínio, para prevenir

a existência de fugas. Durante a molhagem não foi registado qualquer empolamento das amostras. A fase de carga incluía incrementos de 100 kPa, com patamares de carga de 24 horas, até a carga máxima de 1,0 MPa. A fase de descarga foi dividida em patamares de 200 kPa, em períodos de 2 horas.

4. COMPORTAMENTO DO ENROCAMENTO DEPENDENTE DO TEMPO

A Figura 2 apresenta a compressibilidade obtida nos ensaios DU50.CG e DU50.PG em escala logarítmica. Pode observar-se que a amostra composta por uma granulometria contínua apresenta uma maior compressibilidade. Antes de realizar este ensaio esperava-se que a amostra composta por uma amostra uniforme apresentasse uma maior compressibilidade, uma vez que um menor número de pontos de contacto entre partículas iria originar concentração de tensões e, por sua vez, uma maior quebra de partículas. Porém, essa maior deformabilidade não se verificou. No final deste trabalho refere-se novamente este assunto para justificar este comportamento.

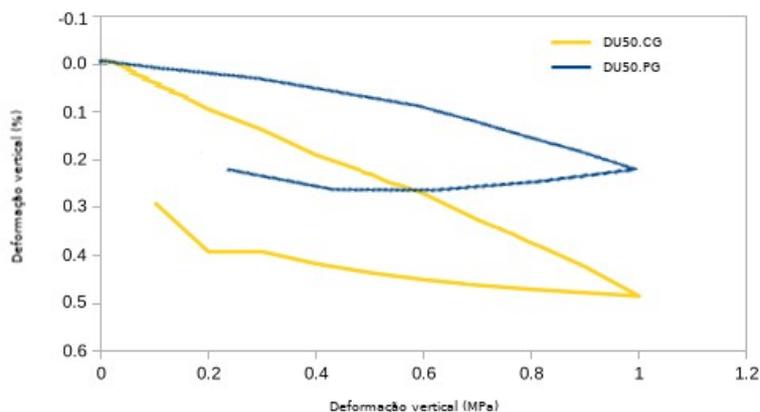


Figura 2 - Compressibilidade obtidas para as granulometrias ensaiadas

A Figura 3 apresenta a evolução das deformações axiais durante os ensaios edométricos. As cargas foram aplicadas em incrementos de 100 kPa até 1 MPa, com patamares de 24 horas, e as leituras foram feitas desde o início de cada ensaio. Devido ao facto da taxa de deformação das placas ser constante, os incrementos de carga tiveram durações diferentes, dependendo da compressibilidade do material. No início de cada ensaio, os incrementos podiam durar cerca de 10 minutos, mas para cargas mais elevadas, podiam durar cerca de 90 segundos.

Em cada ensaio foram registados dois tipos de deformação axial. A primeira, instantânea, surgia imediatamente na aplicação de um novo patamar de carga, e dependiam da sua taxa de deformação. Este comportamento rapidamente evoluía para o segundo tipo de deformação, que era dependente do tempo, quando a carga aplicada era mantida constante.

Estas deformações, em particular, são controladas pelo aumento de compacidade das amostras durante os ensaios. Pode observar-se que nos primeiros 5 incrementos de carga (100 a 500 kPa) da Figura 3, à medida que a carga aumenta, a taxa de deformação também aumenta, diminuindo consideravelmente depois da aplicação da carga. Nos patamares seguintes este efeito desaparece gradualmente, sugerindo que a deformação pode dividir-se numa componente de deformação instantânea e numa componente dependente do tempo. Comportamento semelhante foi observado por Oldecop (2000) and Ortega (2008). A Figura 4a permite analisar a deformação durante

os primeiros 10 minutos dos patamares de carga de 100, 500 e 1000 kPa. Apesar dos incrementos serem constantes e iguais a 100 kPa, a máxima taxa de deformação durante a aplicação da carga aumentou ligeiramente com a carga aplicada. O período em que esta carga foi aplicada diminuiu até 500 kPa (Figura 4b), a partir do qual manteve-se praticamente constante.

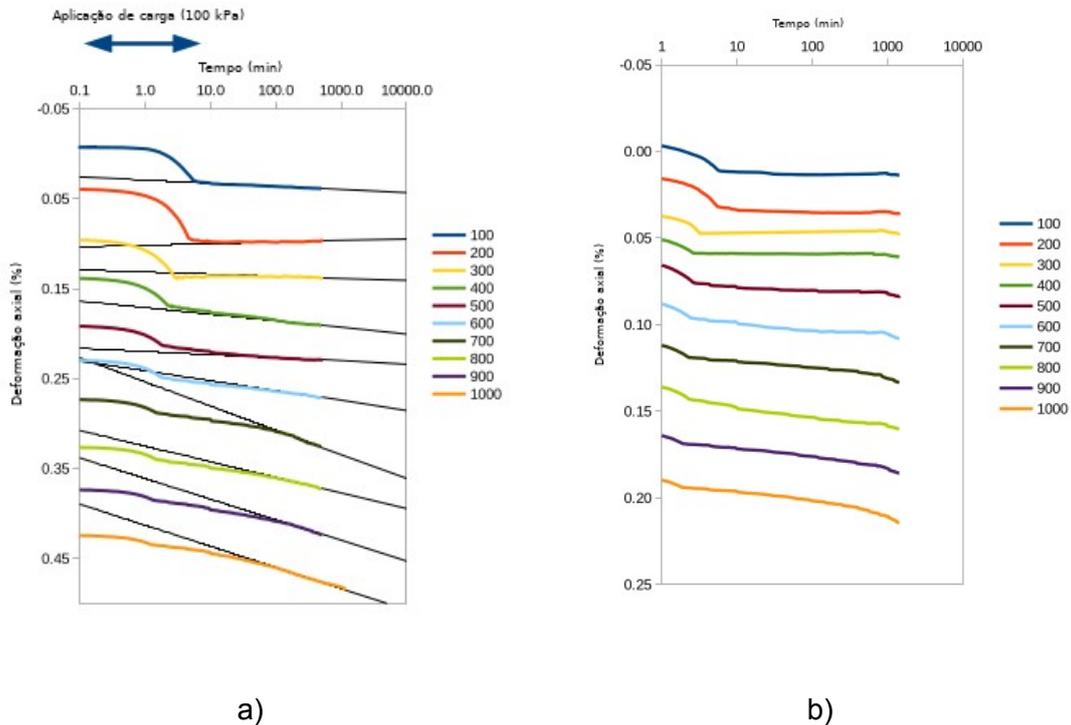


Figura 3 - Evolução das deformações axiais durante o ensaio: a) DU50.CG e b) DU50.PG

A Figura 2 mostra que a linha de compressão normal (LCN) num gráfico de tensões-deformações segue uma reta, como se pode ver em ambos os ensaios. Esta evidência sugere que, para cada ensaio individualmente, um valor constante de incremento de tensão pode originar incrementos de deformação idênticos, independentemente do estado de tensão. Oldecop (2000) concluiu que somando as componentes instantânea e dependente do tempo, para os respetivos patamares de carga, iria resultar num valor constante. Este comportamento é apenas possível se a componente instantânea da deformação diminuir com a carga aplicada enquanto a componente dependente do tempo aumenta. Esta conclusão pode ser observada na Figura 3 e confirmada analisando as compressibilidades instantânea e deferida no tempo, Figura 5, para as duas granulometrias ensaiadas. Cada coeficiente de compressibilidade (instantâneo e deferido no tempo) foi determinado pelo rácio do incremento de deformação e o respetivo incremento de tensão.

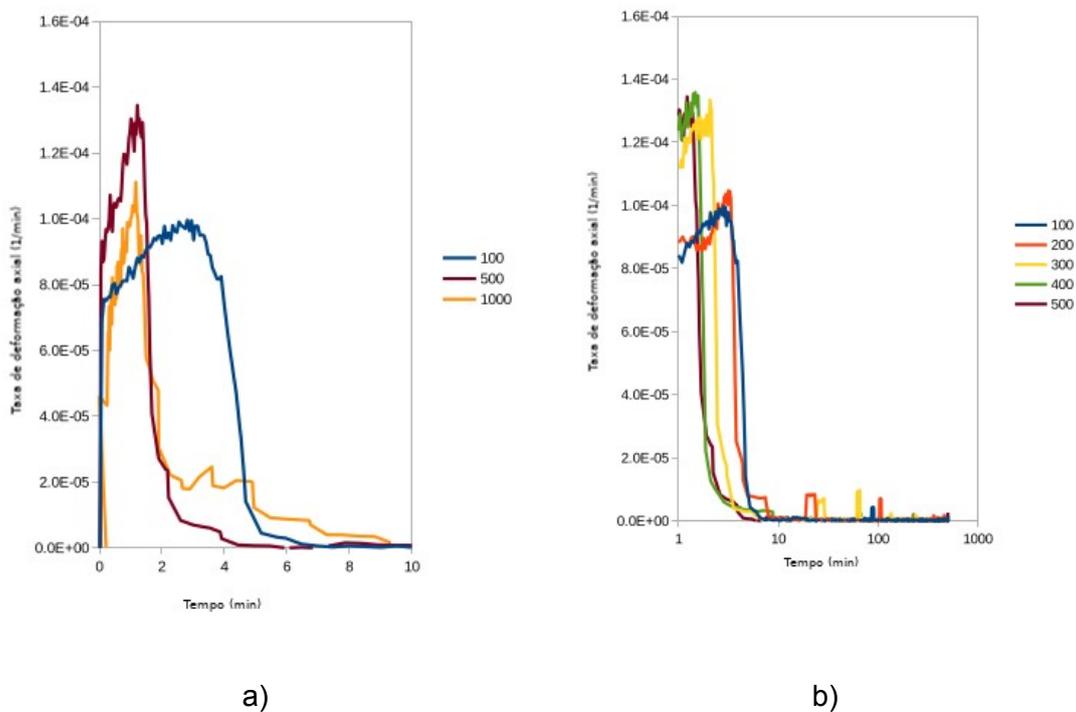


Figura 4 - Evolução da taxa das deformações axiais, no ensaio DU50.CG: a) patamares 100, 500 e 1000 kPa, b) primeiros 5 patamares de carga

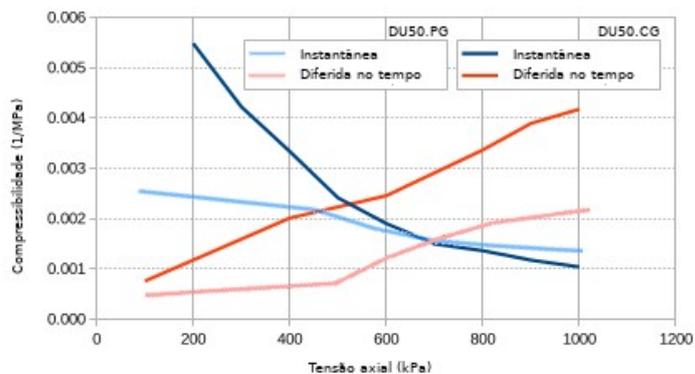
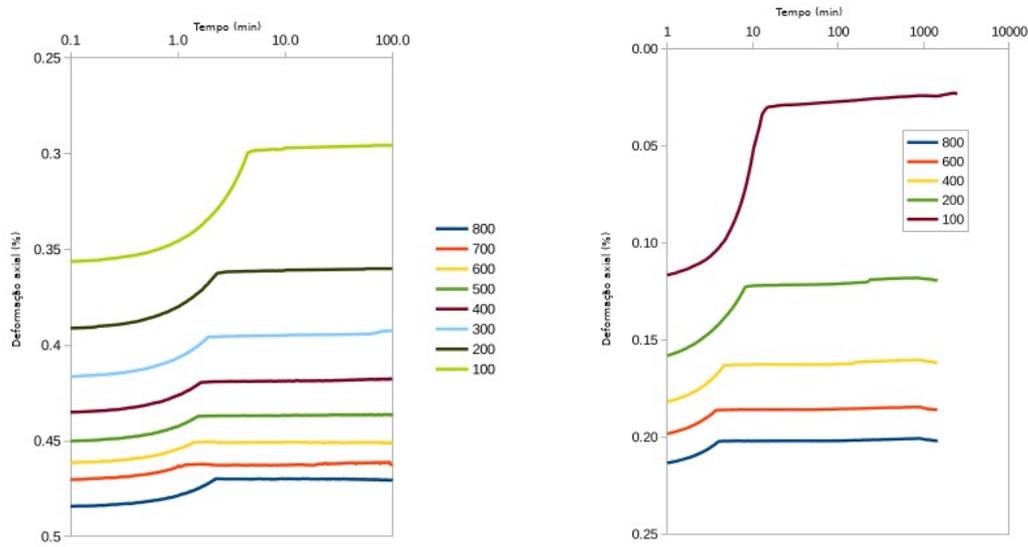


Figura 5 - Análise das compressibilidades instantânea e diferidas no tempo

Contrapondo os resultados da fase de carga com a descarga, as deformações axiais são essencialmente instantâneas e estabilizam após um pequeno período de tempo, como se pode ver na Figura 6. O período de estabilização é relativamente pequeno nos primeiros patamares de descarga (≈ 1 minuto na descarga de 800 para 700 kPa), aumento à medida que a carga diminui.



a)

b)

Figura 6 - Evolução das deformações axiais durante a descarga: a) DU50.CG e b) DU50.PG

Oldecop (2000) observou que, em compressão, após um certo período de tempo da aplicação da carga (≈ 10 minutos na Figura 3a), a relação entre a deformação axial e o logaritmo do tempo pode ser caracterizado pela equação seguinte:

$$\epsilon = \lambda^t \ln(t/t^r) + \epsilon^r \quad [1]$$

onde λ^t representa o índice de compressibilidade diferido no tempo, equivalente conceptualmente ao índice de compressão secundário de argilas, ϵ^r representa o valor de deformação correspondente ao um tempo arbitrário de referência t^r . Para os ensaios estudados adotou-se um valor igual a 1000 minutos. Admitindo que λ^t , ϵ^r e t^r são constantes, ajustou-se a equação aos resultados obtidos. A Figura 3a apresenta esse ajuste representado pelas linhas pretas, para cada patamar de carga. Oldecop (2000) refere estas linhas como linhas de fluência normal. A Figura 7 apresenta os valores do índice de compressibilidade diferido no tempo, λ^t , em relação à tensão axial aplicada. Para valores baixos de tensão axial, λ^t apresenta valores praticamente nulos, o que significa que não se registaram deformações diferidas no tempo, a deformação foi devida apenas ao rearranjo de partículas.

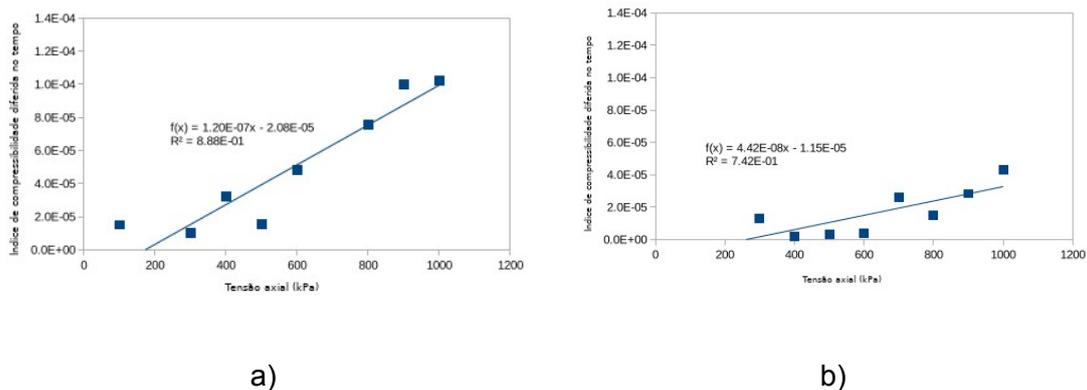


Figura 7 - Relação do índice de compressibilidade diferida no tempo com a tensão axial para o ensaio: a) DU50.CG e b) DU50.PG

5. ANÁLISE DA QUEBRA DE PARTÍCULAS

Após realizar os ensaios edométricos secou-se o material e determinaram-se as granulometrias. Isto permitiu quantificar a quebra de partículas, induzida pela trajetória tensão-deformação adotada. Para quantificar este efeito determinou-se o índice de quebra proposto por Marsal (1965) e que se representa por B_g . Marsal desenvolveu este índice após realizar ensaios triaxiais sobre enrocamento em câmaras de grandes dimensões, considerando a variação da granulometria antes e após ensaio. Após determinar a diferença em percentagem do material retido em cada peneiro, pode determinar-se B_g somando os valores positivos obtidos, expressos em percentagem. O índice varia entre 0, quando não ocorre nenhuma quebra, e 1 (100 %), indicando que todas as partículas partiram para dimensões inferiores ao menor peneiro utilizado.

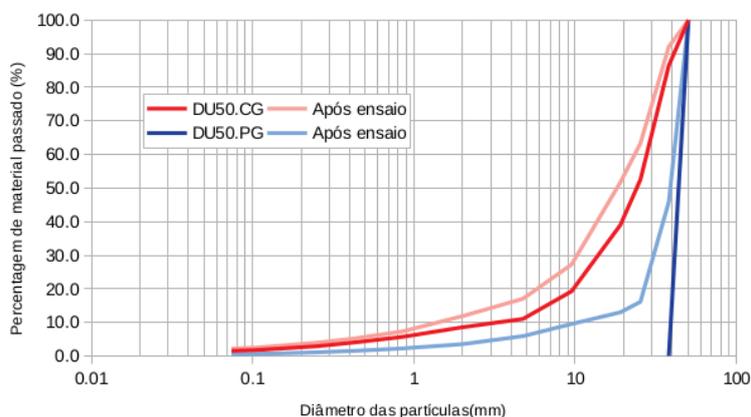


Figura 8 - Granulometrias antes e após realização dos ensaios edométricos

Os valores obtidos foram 9 % (DU50.CG) e 46 % (DU50.PG). Como esperado, o maior valor foi obtido no ensaio DU50.PG e o índice de Marsal espelha de forma clara a diferença entre os ensaios. Como se pode observar, na granulometria uniforme registou-se uma quebra de partículas consideravelmente elevada, quando comparada com a granulometria contínua. A quebra das partículas ocorrida na granulometria uniforme, em particular durante a compactação, pode ter originado uma ocupação dos vazios mais eficiente. Como tal, a granulometria da amostra deixou de ser uniforme tornando-se contínua, o que pode explicar a menor compressibilidade do ensaio

DU50.PG, quando comparado com o resultado do ensaio DU50.CG. Neste trabalho não foram analisadas as granulometrias após compactação, informação que poderia ajudar a perceber melhor esta questão.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizaram-se ensaios edométricos, sobre uma granulometria contínua e uma uniforme, para estudar o comportamento de enrocamento, nomeadamente, a existência de deformações instantâneas e diferidas em resposta à aplicação de uma dada carga, e a quebra de partículas que daí resulta.

No início deste trabalho esperava-se que a amostra com granulometria uniforme apresentasse maior compressibilidade, quando comparada com a amostra contínua. Porém, verificou-se exatamente o contrário. Tal situação deveu-se possivelmente à maior quebra de partículas da amostra uniforme, em particular durante a fase de compactação, levando a um preenchimento dos vazios mais eficiente e tornando a granulometria contínua.

Para caracterizar a quebra de partículas determinou-se o índice de quebra de Marsal e mostrou-se que foi capaz de caracterizar a maior quebra de partículas registada no provete com a granulometria uniforme.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostavam de agradecer aos técnicos Amílcar Gonçalves e Joaquim Timóteo pelo importante apoio na realização dos ensaios apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Chávez, C. (2004). *Estudio del comportamiento triaxial de materiales granulares de tamaño medio con énfasis en la influencia de la succión*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gamboa, C. (2011). *Mechanical behaviour of rockfill materials application to concrete face rockfill dams*. PhD thesis, École Centrale de Paris.
- Marsal, R. J. (1965). Stochastic processes in grain skeleton of soils. *Proceedings of 6th ICSMFE*, pp 303–307.
- Marsal, R. J. (1967). *Large-Scale Testing of Rockfill Materials*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 93(2):27–43.
- Oldecop, L. (2000). *Compresibilidad de Escolleras - Influencia de la Humedad*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Oldecop, L. A. e Alonso, E. E. (2001). *A model for rockfill compressibility*. Géotechnique, 51(2):127–139.
- Ortega, E. (2008). *Gruesos. Efecto de la succión*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Veiga Pinto, A. (1983). *Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento*. PhD thesis, LNEC.