

**COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ATERROS DE ARGILA
EXPANDIDA (LECA®)**

**STRUCTURAL BEHAVIOUR OF EMBANKMENTS OF LIGHT EXPANDED
CLAY AGGREGATES (LECA®)**

Caldeira, Laura, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*
Cardoso, Rafaela, *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, rafaela@civil.ist.utl.pt*
Maranha das Neves, Emanuel, *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, emn@civil.ist.utl.pt*

RESUMO

Inicialmente apresenta-se o estudo realizado para caracterização da estrutura de uma partícula de argila expandida (LECA®). A partícula do material é tratada como um fragmento de rocha em que é dada atenção especial ao papel da sucção (ou do teor em água) na sua resistência. O estudo incluiu a realização de ensaios de esmagamento de partículas para diferentes teores em água e a determinação da sua curva de retenção. Os resultados são interpretados considerando a porosidade do material, analisada através de porosimetrias por intrusão de mercúrio, e a geometria desses poros. Através da realização de ensaios edométricos de agregados, procura-se explicar o comportamento estrutural de aterros construídos com argila expandida. É dada especial importância à presença de água. Conclui-se que é necessária investigação adicional neste domínio.

ABSTRACT

This paper presents the study performed to characterize the structure of a particle of Light Expanded Clay Aggregate (LECA®). The particle is treated as a rock fragment for which special attention is paid to the role of suction (or of the water, in a more broad sense) on its strength. Laboratorial tests were performed including crushing tests for different water contents and the water retention curves. The results from the tests are analysed by considering the porosity of the material investigated through Mercury Intrusion Porosimetry tests. Results of oedometer tests on the aggregates are used to explain the structural behaviour of embankments where expanded clay aggregates are employed. Water presence is treated with special care. This study indicates that this matter requires additional research.

1. INTRODUÇÃO

O uso de argila expandida (designação comercial LECA®) na construção de aterros rodoviários e no aligeiramento de fundações pode ser uma alternativa bastante vantajosa quando os terrenos de fundação são muito deformáveis. Contudo, o uso generalizado deste material requer o conhecimento das suas características de resistência e de deformabilidade.

Num projecto de investigação realizado pelo LNEC e pelo IST e financiado pela Saint-Gobain Weber Portugal S.A. foram efectuados ensaios edométricos de agregados em condições secas e submersas. Este estudo é importante pois poderá esclarecer algumas questões relacionadas com os processos construtivos adoptados em aterros de LECA®, nomeadamente a necessidade ou não de adicionar água para controlo da compactação. Ao contrário da construção de aterros de enrocamento, tais como barragens, em que é necessário adicionar água para minimizar a

ocorrência de assentamentos diferidos no tempo (Maranha das Neves, 1993 e Oldecop e Alonso, 2007, por exemplo), em aterros de LECA® não é usual a adição de água.

Em analogia com o estudo geralmente efectuado para enrocamentos, o comportamento observado para partículas de LECA® foi analisado considerando a evolução da estrutura do material granular. Em enrocamentos os assentamentos explicam-se por um mecanismo de rotura das partículas devida à concentração de tensões nos contactos. Este mecanismo é fortemente influenciado pela presença de água, pois esta propicia a fractura (Oldecop e Alonso, 2003 e 2007). Como a fracturação dos blocos é seguida do rearranjo dos fragmentos, este mecanismo explica as deformações diferidas no tempo medidas em aterros construídos com materiais granulares com dimensões relativamente elevadas (Sowers et al., 1965, Marsal et al., 1976, Veiga Pinto, 1983, Oldecop e Alonso, 2001).

Procedeu-se à caracterização da estrutura de uma partícula de LECA® como se se tratasse de um fragmento de rocha. Como tal, foi dada atenção especial ao papel da sucção (ou do teor em água) na sua resistência. O estudo incluiu a realização de ensaios de esmagamento de partículas para diferentes teores em água e a determinação da sua curva de retenção. Os resultados são interpretados considerando a porosidade do material, analisada através de porosimetrias por intrusão de mercúrio, e a geometria desses poros.

Os resultados obtidos nos ensaios de partículas de LECA® foram usados para explicar o comportamento observado nos ensaios edométricos de agregados. Foi dada especial importância à presença de água pois, apesar de não se verificarem diferenças significativas nos ensaios dos agregados para os casos submersos e não saturados, aparentemente as partículas têm resistência diferente consoante o seu teor em água. É necessário mais investigação neste domínio.

2. ESTUDO DE PARTÍCULAS INDIVIDUAIS

2.1. Principais Propriedades das Partículas de LECA®

As partículas de LECA® são partículas leves de argila expandida fabricadas submetendo argila e aditivos a altas temperaturas (Maxit, 2006). Para fins geotécnicos, as partículas resultantes deste processo de fabrico são frequentemente esferas com diâmetros entre 10 mm e 32 mm.

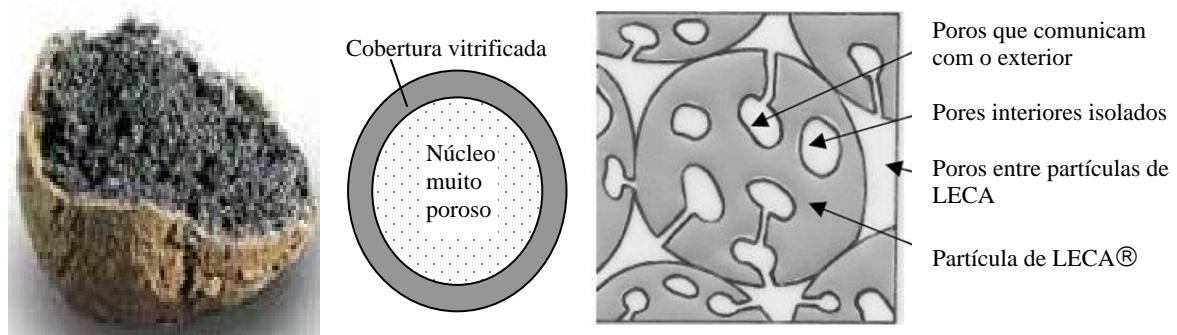


Figura 1 – Partícula de LECA

Como se pode ver na Figura 1, as partículas são muito porosas. No interior das partículas podem identificar-se duas zonas distintas (Figura 1): O núcleo é constituído por um material muito poroso semelhante a uma rocha vulcânica e a periferia é um material de estrutura amorfa que resulta da vitrificação da argila causada pelo arrefecimento rápido e pela adição de carbonato de cálcio. O tratamento tem também efeito na mineralogia das argilas, pois o material do interior

das partículas, após estas serem esmagadas e convertidas em pó, é não plástico. A mineralogia das partículas apresenta-se na Figura 2 para as várias origens das argilas usadas no fabrico de LECA® (a fábrica em Portugal situa-se em Avelar). Nesta figura, os minerais identificados são (pela ordem do mais abundante para o menos): Fase vítrea silicatada, Hercinite, Spinal, Óxido de Ferro, Quartzo, Feldspato, Anortite e Diopsite. Consta-se que os minerais argilosos são praticamente inexistentes.

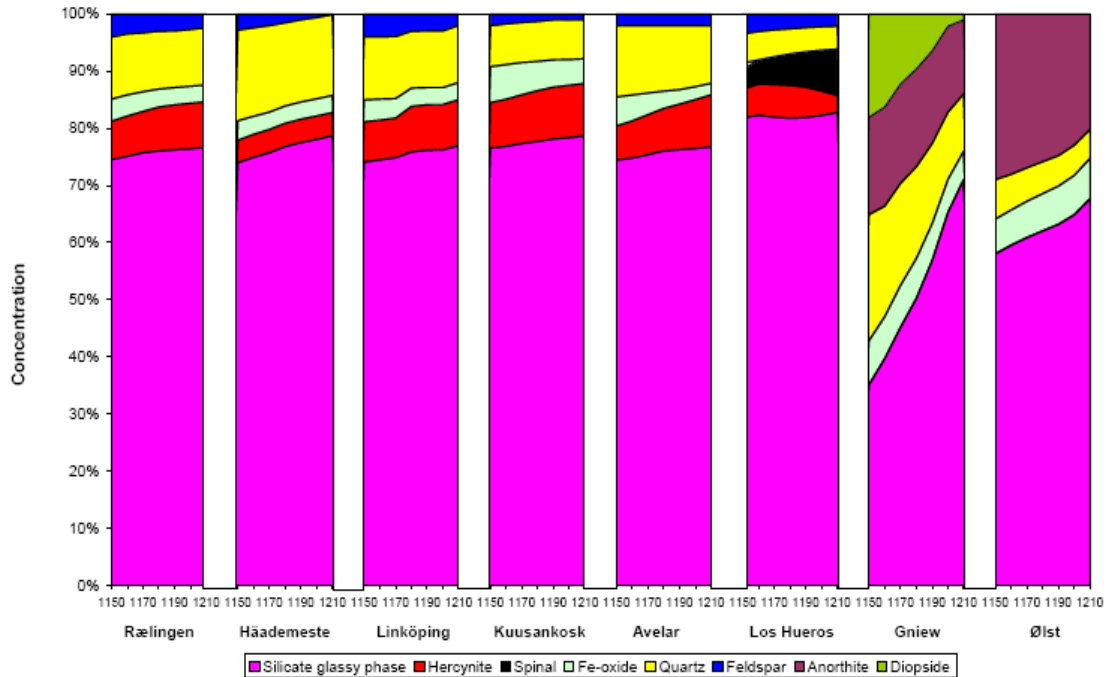


Figura 2 – Constituição Mineralógica das Partículas de LECA® (Maxit, 2006)

Existe uma percentagem significativa de poros que estão isolados do exterior e por esse motivo é muito difícil saturar completamente o material. Esta dificuldade é acrescida da geometria particular dos poros não isolados e directamente em contacto com o exterior pois, como se pode observar em fragmentos de partículas, os diâmetros dos poros são menores mais perto da superfície do que no seu interior. Esta distribuição explica-se pela vitrificação da camada exterior e tem como efeito formar uma película impermeabilizante que dificulta muito a entrada de água e a consequente saída de ar.

Realizaram-se porosimetrias por intrusão de mercúrio em partículas aproximadamente esféricas com 10 mm de diâmetro, com e sem o revestimento vitrificado, para avaliar se essa vitrificação permite explicar a geometria peculiar dos poros. Os resultados apresentam-se na Figura 3, onde se constata que existe maior quantidade de poros menores nas partículas com a camada de protecção exterior, pois os picos da distribuição registados são maiores nas menores dimensões.

A porosidade das partículas depende obviamente do seu diâmetro, mas é possível identificar uma porosidade média de 70%. Podem-se obter valores de teor em água, para uma situação de saturação, de cerca de 180%. O peso volúmico das partículas sólidas é 17 kN/m^3 e o peso volúmico seco é 5 kN/m^3 .

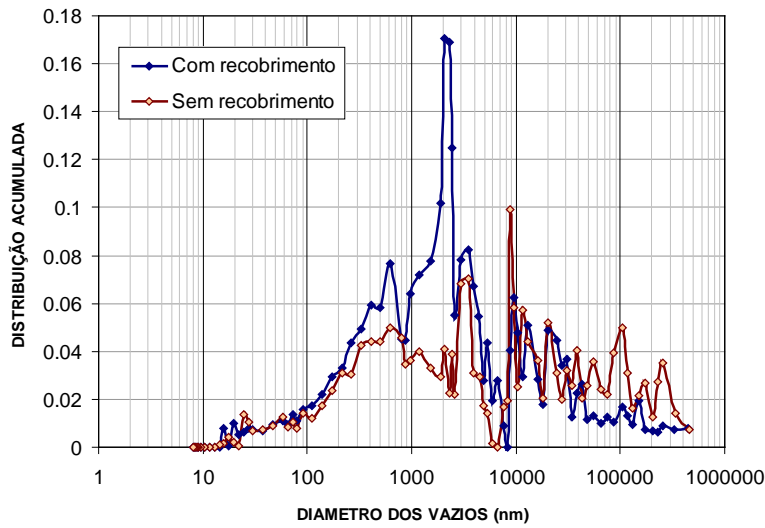


Figura 3 – Resultados das Porosimetrias por Intrusão de Mercúrio Efectuadas em Partículas Esféricas com 10 mm de Diâmetro

2.2. Curva de Retenção

A capacidade de retenção de água de partículas com e sem o revestimento exterior (Figura 4) foi medida através da determinação da curva de retenção para partículas com 10 mm de diâmetro. Estudaram-se trajectórias de secagem e de molhagem. No caso da secagem, as partículas foram completamente saturadas em vácuo antes do ensaio. Teve que se recorrer a vácuo pois é muito difícil molhar o interior das partículas devido à camada exterior vitrificada e à geometria dos poros. A molhagem foi efectuada adicionando pequenas quantidades de água, mas não se conseguiu saturar completamente as partículas, pois a geometria dos poros propicia o aprisionamento de bolhas de ar nos poros.

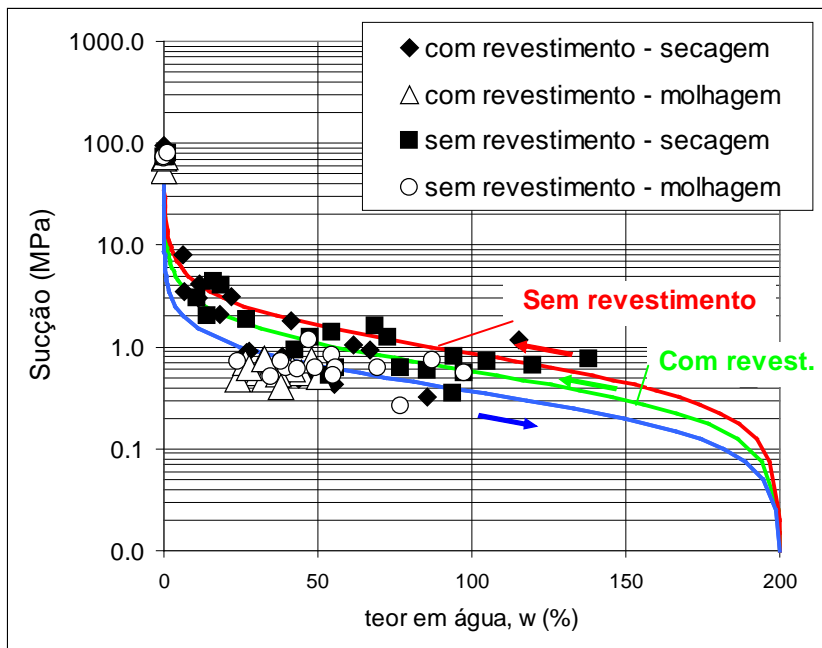


Figura 4 – Curvas de Retenção de Partículas “Esféricas” com 10 mm de Diâmetro

As curvas de retenção fornecem a relação entre teor em água e sucção. A sucção foi medida com o equipamento WP4, tendo-se seguido o procedimento experimental descrito por Cardoso et al. (2007). Finalmente, a evolução do teor em água foi determinada pelo controlo do peso. Os pontos experimentais foram ajustados com a equação proposta por Romero e Vaunat (2000).

Como se pode observar na Figura 4, as trajectórias de molhagem são semelhantes para as partículas com e sem o revestimento exterior. Para a secagem, a curva medida para as partículas sem o revestimento está acima da curva medida para as partículas com o revestimento, o que indica que a secagem é mais fácil quando não há revestimento. Este resultado também se explica pela geometria particular dos poros, que dificulta a saída de água.

Foram também analisadas partículas com diâmetros superiores a 10 mm, pois a influência do recobrimento exterior nas características hidráulicas da LECA® depende da escala. Foram obtidos resultados semelhantes.

2.3. Ensaio de Esmagamento

Como se referiu anteriormente, a compressibilidade do material granular está relacionada com a fractura das partículas que o constituem. O processo de fractura é fortemente influenciado pela água, pois esta reduz a tenacidade do material, que neste caso pode ser interpretada como a sua resistência à abertura de fendas (Oldecop e Alonso, 2003).

A resistência ao esmagamento de partículas de LECA® com diferentes diâmetros e teores em água foi medida em ensaios de esmagamento. A Figura 5.a) mostra o esquema do ensaio.

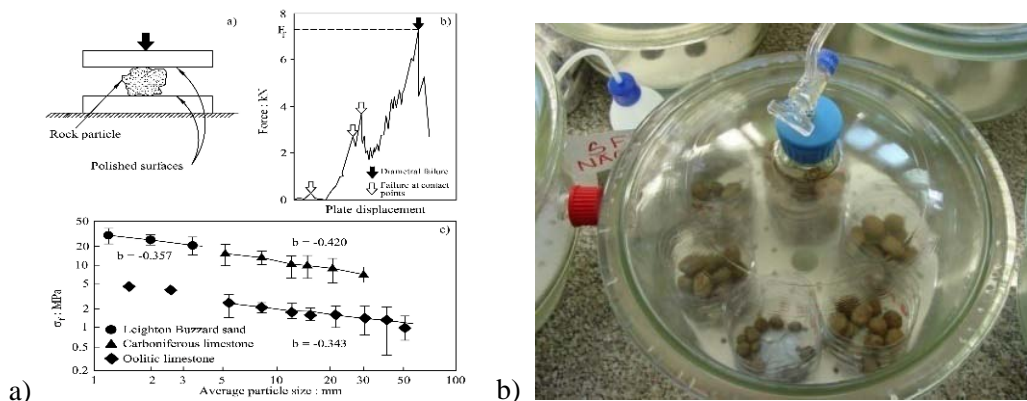


Figura 5 – Ensaio de Esmagamento de Partículas com Diferentes Humidades Relativas: A) Esquema do Ensaio (Mcdowell e Bolton, 1998); B) Equilíbrio de Vapor para Aplicação de Sucção.

O teor em água foi aplicado mantendo as partículas em exsiccadores, numa atmosfera com humidade relativa controlada, como se mostra na Figura 5.b). Este processo de aplicação de sucção consiste na técnica de equilíbrio de vapor. Considerando o ar húmido como um gás perfeito, a relação entre sucção ψ e humidade relativa HR é dada pela lei psicrométrica (Equação 1) (Fredlund e Rahardjo, 1993), em que R é a constante universal dos gases (8.31 J/(mol K)), T é a temperatura absoluta, M é a massa molecular da água (18.018 kg/mol) e ρ_w é a massa volúmica da água (998 kg/m³ a 20°C). Foram aplicadas as humidade relativas de 85%, 75%, 100% (saturação completa) e 50% (humidade relativa do laboratório) que, a 25°C, correspondem, respectivamente, às sucções 22 MPa, 39 MPa, 0 MPa e 94 MPa.

$$\psi = -\frac{RT\rho_w}{M} \ln(HR) \quad [1]$$

Os resultados dos ensaios de esmagamento apresentam-se na Figura 6. Foram ensaiados os diâmetros 10, 20 e 32 mm, dado que a resistência ao esmagamento depende da dimensão da partícula, de acordo com a Equação 2, onde P é a força de esmagamento, D é o diâmetro e η e λ são constantes que dependem do tipo de material. Griffith (1920), Veiga Pinto (1983) e Lee (1992), por exemplo, publicaram resultados experimentais que comprovam a validade desta expressão para diferentes materiais. Os parâmetros encontrados para a LECA® apresentam-se no Quadro 1. A explicação mais corrente para a resistência depender do diâmetro é a de que tratando-se de uma força, esta é função da sua área e quanto maior for o tamanho da partícula, maior é a probabilidade de ter um pequeno defeito ou pequena fenda que lhe reduz a resistência.

$$P \approx \eta D^\lambda \quad [2]$$

Quadro 1 – Parâmetros de Calibração da Equação 2 (Almeida, 2009)

HR (%)	η	λ
50 (seca)	11,3	0,6
75	10,3	0,6
87	9,4	0,8
100 (saturada)	6,5	1,3

Como se pode verificar na Figura 6, a resistência ao esmagamento aumenta linearmente com o diâmetro das partículas numa relação bi-logarítmica.

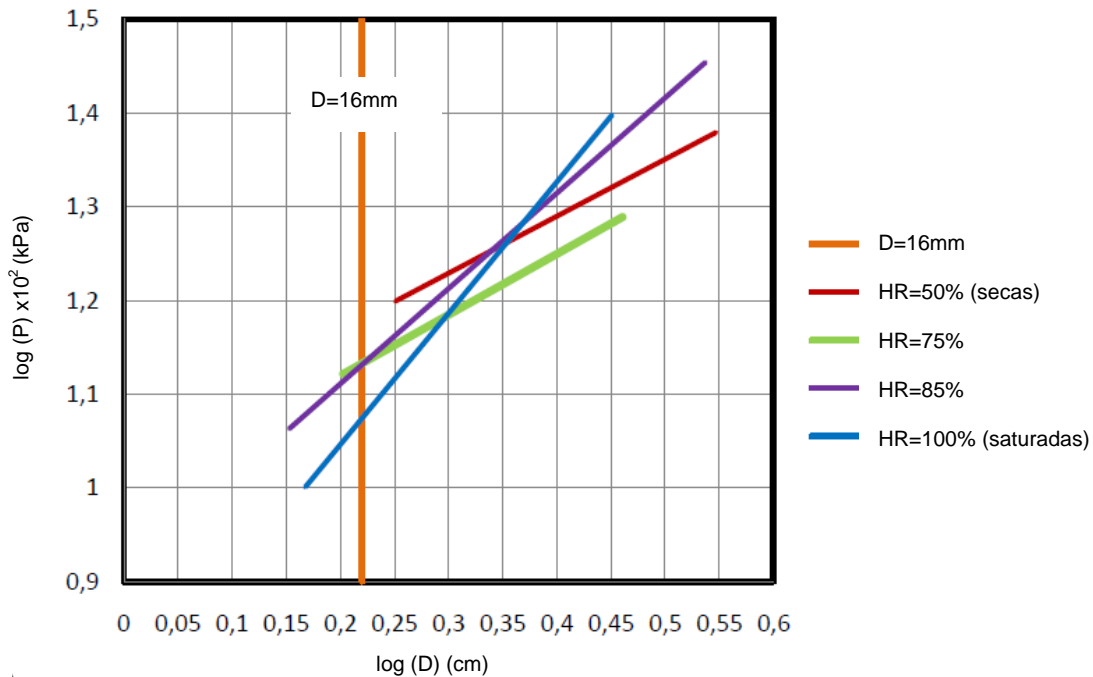


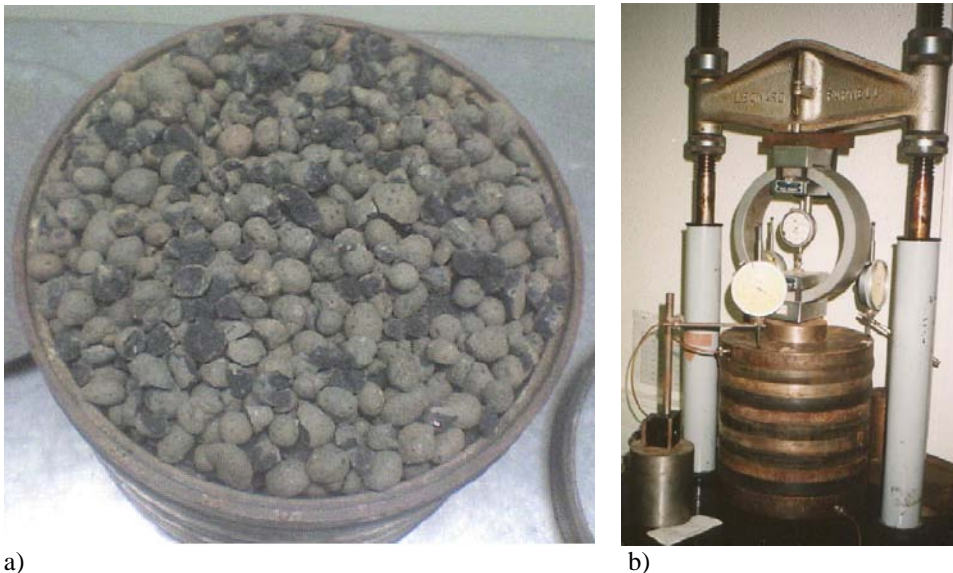
Figura 6 – Resultados dos Ensaios de Esmagamento (Almeida, 2009)

Esta observação é válida para todas as humidades relativas estudadas. No entanto, de forma semelhante à que se observa em ensaios de partículas de enrocamento, esperava-se que a resistência diminuísse com o aumento da humidade relativa (no diagrama, as rectas para humidades relativas crescentes deviam ter declives decrescentes e as respectivas ordenadas para o mesmo diâmetro estarem dispostas de modo decrescente com o valor da humidade relativa) mas tal não se verifica. Este resultado pode-se explicar sobretudo pela larga dispersão de valores

encontrados, eventualmente pela não detecção, antes dos ensaios, de pequenas fendas, ou porque as partículas não tenham estado tempo suficiente no exsiccador para se atingir o equilíbrio entre a humidade relativa exterior e a instalada no interior das partículas (principalmente no caso de humidades relativas baixas). Assim, é um assunto que requer investigação adicional.

3. ESTUDO DE AGREGADOS DE PARTÍCULAS: ENSAIOS EDMÉTRICOS

Foram realizados ensaios edométricos em amostras preparadas com uma granulometria com diâmetros entre 10 mm e 20 mm (Figura 7). Nesta figura são visíveis fragmentos juntamente com as partículas inteiras (mais conforme com a realidade). Para os ensaios usou-se uma célula preparada para anular o atrito lateral (Veiga Pinto, 1983), com um diâmetro de 0,23 m para permitir a montagem de amostras representativas. O peso volúmico na montagem foi de 2,92 kN/m³, conseguido por vibração.



a) b)
Figura 7 – Ensaio Edométrico: a) Amostra Antes do Ensaio; b) Equipamento Usado para Ensaio

Realizaram-se dois ensaios para comparar a diferença no comportamento entre amostras montadas sem água, simulando condições de colocação realistas, e amostras montadas completamente submersas. Foram denominadas respectivamente por amostra seca e amostra embebida. O principal objectivo destes ensaios é verificar se o material se comporta como um enrocamento, pois, se assim for, são esperadas grandes diferenças de comportamento nos dois casos. Os resultados apresentam-se na Figura 8.

A tensão vertical máxima atingida foi 140 kPa, um valor que permite simular as tensões a que estes materiais estão normalmente sujeitos no terreno. Apesar de ser um valor relativamente baixo, foi possível detectar uma apreciável cedência do material, pois as deformações observadas não foram recuperadas no final do ensaio (Figura 8, material embebido). Indicação semelhante é dada pelas descargas parciais, como se mostra na Figura 8. Estas deformações irreversíveis não podem, no entanto, ser explicadas pela rotura das partículas, visto que a comparação da granulometria das amostras, antes e depois do ensaio, não relevou grandes alterações (provavelmente em resultado dos baixos níveis de tensão).

Mediu-se o índice de compressibilidade elastoplástica C_c e o módulo edométrico M' . Obteve-se $C_c=4,59$ e $M'=5$ MPa, para a amostra seca, e $C_c=5,21$ e $M'=6$ MPa, para a amostra embebida. O índice de compressibilidade elástica C_s também foi medido para a amostra embebida tendo-se obtido 0,298.

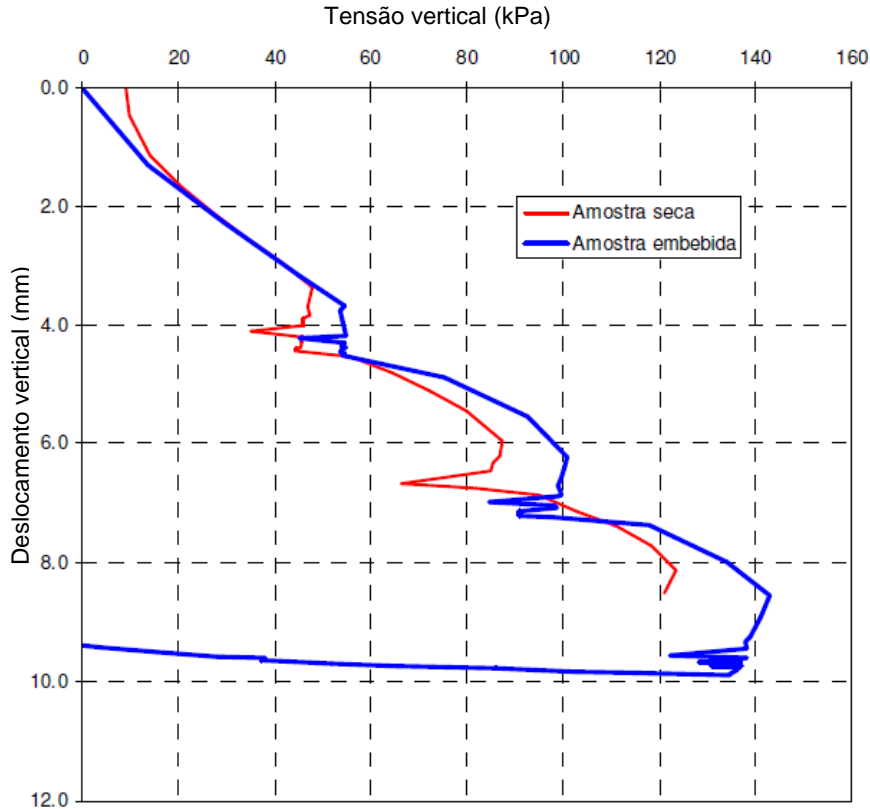


Figura 8 –Resultados dos Dois Ensaios Efectuados

As diferenças encontradas na comparação dos dois ensaios foram reduzidas, o que se pode explicar por não se ter conseguido saturar as partículas na embebição. O facto de o teor em água não se ter alterado depois do ensaio da amostra embebida comprova que a molhagem foi apenas superficial, o que fica a dever-se à dificuldade de molhar as partículas, facto já mencionado anteriormente quando se analisou a capacidade de retenção de água. Assim, embora os resultados pareçam indicar que a rigidez dos aterros de agregados de partículas de LECA® não é sensível à água, tal não fica inequivocamente provado. Há pois que realizar um trabalho experimental em que sejam contornadas as dificuldades assinaladas.

4. CONCLUSÕES

O estudo da porosidade efectuado para partículas de LECA® de diferentes dimensões mostrou que a geometria particular dos poros, induzida pelo processo de fabrico, tem um papel muito importante na sua capacidade de retenção de água.

Os resultados obtidos no estudo da rigidez de agregados de partículas de LECA® podem ser explicados pelos resultados dos ensaios efectuados para partículas individuais, pois o facto de não se terem notado diferenças significativas na comparação dos ensaios efectuados em amostras secas e embebidas em água pode explicar-se pela dificuldade em molhar este material. No entanto, os resultados dos ensaios de resistência ao esmagamento para diferentes teores em

água mostraram que o material não é completamente insensível à água, pelo que se deveria esperar diferenças mais significativas na rigidez. Na realidade esta propriedade pode ser influenciada pela fractura das partículas.

Assim, estes primeiros resultados parecem indicar que não é necessário adicionar água durante a construção de aterros com LECA®. Não seria importante para se atingir o peso volúmico aparente desejado nem seriam de esperar deformações diferidas no tempo induzidas pelas acções atmosféricas (por exemplo, devido a chuva). No entanto este assunto requer uma investigação mais profunda.

Finalmente, o conhecimento adquirido poderá ser útil na definição de equações constitutivas apropriadas para agregados de LECA®, até à data inexistentes e que são fundamentais para um cálculo realista de deformações de estruturas construídas com este material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Saint-Gobain Weber Portugal S.A. pelo fornecimento do material e financiamento que permitiu a investigação e ao Eng. Pedro Almeida os resultados do seu trabalho experimental. Agradecem ainda aos técnicos do LNEC Amélia Reis e Fernando Rodrigues pela ajuda prestada nas tarefas de laboratório.

REFERÊNCIAS

- Almeida, P. (2009). Influência da humidade relativa no comportamento mecânico de LECA, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico
- Cardoso, R., Lima, A., Romero, E. e Ferrari, A. (2007). A comparative study of soil suction measurement using two different high-range psychrometers, *Proc. 2nd International Conference, Mechanics of Unsaturated Soils*, Germany, Springer.
- Fredlund, D. e Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley New York, 1993.
- Griffith, A.A. (1920). The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Royal Soc. London*. A 221, p. 163-198.
- Lee, D. M. (1992). The angles of friction of granular fills. Ph.D. dissertation, University of Cambridge.
- Maranha das Neves, E. (1993) Fills and embankments, General Report, *Geotechnical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks*, Athens, vol. 3, pp. 2023-2037
- Marsal R. J., Arellano L. R., Guzmán M. A. e Adame H. (1976). El Infernillo: Behaviour of dams built in Mexico. *Instituto de Ingeniería*, UNAM, Mexico.
- Maxit (2006), Agregados de LECA®, Catálogo Técnico da Maxit.
- McDowell, G. R. e Bolton, M. D. (1998). On the micromechanics of crushable aggregates. *Géotechnique*, 48(5), pp. 667–679.
- Oldecop L.A. e Alonso E.E. (2001). A model for rockfill compressibility. *Géotechnique*, 51(2), pp. 127-140.
- Oldecop, L.A. and Alonso, E.E. (2003). Suction effects on rockfill compressibility. *Géotechnique*, 53(2), 289-292.
- Oldecop L.A. e Alonso E.E. (2007). Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill. *Géotechnique*, 57(3), pp. 289-301.
- Romero, E e Vaunat, J. (2000). Retention curves of deformable clays. Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, *Proc. Int. Workshop on Unsaturated*

- Soils*, Trento, Italy. A. Tarantino and C. Mancuso (eds), A.A. Balkema Rotterdam, pp 91-108.
- Sowers G. F., Williams R. C. e Wallace T. S. (1965). Compressibility of broken rock and settlement of rockfills. *Proc. 6th ICSMFE*, 2, Montreal, pp. 561-565.
- Veiga Pinto A.A. (1983). Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento. Tese de Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.