

MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO EVOLUTIVO DE MARGAS COMPACTADAS CONSIDERANDO A PRESENÇA DOS FRAGMENTOS

Modelling the evolutive behaviour of compacted marls considering the presence of the fragments

Rafaela Cardoso*

RESUMO – Alguns aterros da Autoestrada A10 foram construídos com margas compactadas, que consistem num conjunto de fragmentos cujas dimensões e arranjo dependem do processo de compactação. Porque as margas são materiais com comportamento evolutivo, os fragmentos de marga sofrem forte degradação física quando sujeitos às acções atmosféricas (essencialmente molhagem e secagem), de onde resultam assentamentos que poderão ter consequências no comportamento dos aterros. Foram efectuados ensaios edométricos de material compactado de modo a caracterizar o seu comportamento quando sujeito a ciclos de molhagem-secagem. Observou-se uma evolução de um comportamento típico de materiais tipo enrocamento, quando ainda não há degradação dos fragmentos, para um comportamento típico de materiais argilosos, após haver degradação. Neste artigo apresenta-se o estudo efectuado para compreender este fenómeno e para definir um modelo constitutivo para as margas compactadas. Na primeira parte é efectuado o estudo do mecanismo de degradação de um fragmento rochoso devido a saturação, com base num modelo de elementos finitos, recorrendo a com um modelo constitutivo aplicável a solos não saturados. Na segunda parte apresenta-se o modelo constitutivo definido para o fragmento considerando a sua degradação física através de um parâmetro de dano. Este modelo é depois incorporado no modelo definido para as margas compactadas, que se apresenta na terceira parte. Trata-se de um modelo elastoplástico com endurecimento e amolecimento, definido em termos de tensões totais e que inclui a sucção como variável de estado. Considera a existência de dois níveis estruturais (o do arranjo dos fragmentos e o dos próprios fragmentos) e a sua interacção através de funções de interacção. Este modelo foi usado para reproduzir vários ensaios edométricos.

SYNOPSIS – Some embankments of A10 Motorway were constructed with compacted marls, which consist of a set of fragments whose dimensions and structure depend on the compaction process adopted. Because marl is an evolving material, the fragments of marl suffer heavy physical degradation when subjected to atmospheric actions (essentially wetting and drying), resulting in settlements that may have consequences on the behavior of the embankments. Oedometric tests on the compacted material were performed in order to characterize its behavior when subjected to wetting-drying cycles. An evolution from rockfill-like behavior (when there is still no degradation of the fragments) to behavior typical of clayey materials (after degradation) was observed. This paper presents the study carried out to understand this phenomenon, as well to define an adequate constitutive model for the compacted material. The first part focus the study of the mechanism of degradation due to saturation, based on a finite element model of a fragment of rock, adopting a constitutive model for unsaturated soils. The second part presents the constitutive model defined for the marl fragment considering its physical degradation through a damage parameter. This model is then incorporated in the model defined for the compacted marls presented in the third part, used to simulate the tests. It is an elastoplastic model with hardening and softening, defined in total stresses and considering suction as state variable. Two structural levels are considered (fragments and their arrangement) as well as their interaction.

Palavras Chave – Margas compactadas, solos não saturados, comportamento evolutivo, deformações.

Keywords – Compacted marls, unsaturated soils, evolutive behaviour, deformations.

* Professora Associada, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. CERIS. orcid.org/0000-0002-4551-3868
E-mail: rafaela.cardoso@tecnico.ulisboa.pt.

1 – INTRODUÇÃO

O uso de materiais não tradicionais na construção de obras de aterro tem-se tornado numa alternativa necessária devido a razões ambientais e de sustentabilidade. As margas compactadas são um exemplo deste tipo de materiais, e foram usadas na construção de alguns aterros da A10, sublanço Arruda dos Vinhos/ Carregado. O seu uso requereu alguns cuidados, descritos detalhadamente por Cardoso e Maranha das Neves (2011, 2012). Estes cuidados são explicados pelo facto de se tratar de um material evolutivo, pois as margas sofrem forte degradação física quando sujeitas a ciclos de molhagem-secagem (variações acentuadas de sucção), tal como ilustrado na Figura 1 (fragmentos com diâmetro $4,75 \text{ mm} < D \leq 9 \text{ mm}$, saturados com água destilada). Quando compactadas, as margas resultam num conjunto de fragmentos cujas dimensões e rearranjo estrutural dependem do processo de compactação adoptado. A degradação física dos fragmentos, que consiste no seu amolecimento e fendilhação, tem como consequência alterações acentuadas de rigidez e de resistência que podem afectar o desempenho das estruturas construídas com este tipo de materiais.



Fig. 1 – Degradação de fragmentos de marga quando saturados ($4,75 \text{ mm} < D \leq 9 \text{ mm}$).

Neste artigo apresenta-se o estudo efectuado para compreender este fenómeno de degradação física e para definir um modelo constitutivo para as margas compactadas que possa ser usado, no futuro, na modelação do comportamento dos aterros da A10. Este modelo foi definido considerando elastoplasticidade com endurecimento e incluindo a sucção como variável de tensão, de modo a que pudesse ser implantado facilmente em programas de elementos finitos.

Na primeira parte é efectuado o estudo conceptual do mecanismo de degradação de um fragmento devido a saturação, com base num modelo de elementos finitos de um fragmento definido no programa Code Bright (Olivella *et al.* 1996). Neste estudo pretende-se compreender a razão do fragmento se partir, que é novidade em relação ao que acontece normalmente na molhagem de agregados de argila, que é só se verificar o seu amolecimento. Para tal recorre-se ao Barcelona Basic Model BBM (Alonso *et al.* 1990), que é um modelo constitutivo elastoplástico com endurecimento aplicado a solos não saturados. Na segunda parte apresenta-se o modelo constitutivo definido para o fragmento inspirado no Barcelona Expansive Model, BExM (Gens e Alonso, 1992), também ele um modelo elastoplástico que considera a existência de dois níveis de estrutura, mas que considera a degradação física das margas através de um parâmetro de dano. Este modelo é calibrado considerando dados experimentais que também se apresentam neste artigo. O modelo concebido para o fragmento de marga é preferível ao BBM usado antes para compreender a fendilhação, pois permite reproduzir melhor os efeitos da degradação física do fragmento no seu comportamento mecânico. Pode também ser implementado em qualquer programa de elementos finitos.

Na terceira parte apresenta-se o modelo constitutivo definido para o material compactado, que incorpora o modelo definido para os fragmentos. Trata-se de um modelo elastoplástico definido em termos de tensões totais para materiais não saturados, inspirado no BExM e que considera a

existência de dois níveis estruturais: o primeiro corresponde ao arranjo dos fragmentos e o segundo aos próprios fragmentos. Estes dois níveis estruturais, cada um com o seu próprio modelo de comportamento, interagem entre si através de funções de interacção. Este modelo foi usado para reproduzir vários ensaios edométricos efectuados com várias trajectórias que envolvem variação de tensão e de sucção (através de secagem e molhagem).

2 – COMPORTAMENTO HIDRO-MECÂNICO DE FRAGMENTOS DE MARGAS

As margas estudadas são provenientes da formação da Abadia (Jurássico superior) da zona de Arruda dos Vinhos, Portugal. *In situ*, o material está próximo da saturação (grau de saturação 77%, correspondente ao teor em água $w=17\%$) e a porosidade é de cerca de 35%. Considerando a fracção passada no peneiro ASTM #40, o limite de liquidez é 49% e o índice de plasticidade é 25 (material classificado como CL segundo a Classificação Unificada de Solos), sendo o peso volúmico das partículas sólidas de 27,4 kN/m³. Da análise mineralógica constatou-se a existência de carbonato de cálcio, quartzo, mica, clorite, gesso e alguns minerais argilosos (essencialmente caulinite e bentonite), alguns responsáveis pelo comportamento expansivo observado. Em ensaios de compressão uniaxial e de compressão diametral efectuados em provetes de marga não alterada, com o teor em água próximo do valor *in situ*, obteve-se 5 MPa e 1 MPa para a resistência à compressão e à tracção, respectivamente (Cardoso, 2009). A permeabilidade saturada é baixa ($k_{sat}=7.5 \times 10^{-14}$ m/s).

As características hidro-mecânicas das margas (material rocha, também designado neste artigo por fragmento) foram caracterizadas em laboratório de modo a obter todos os dados necessários para a calibração do modelo numérico. Tal incluiu a caracterização da marga intacta e deste material destruído (preparado com a fracção passada no peneiro ASTM #40, com teor em água igual a 1,5 vezes o limite de liquidez, de acordo com Burland, 1990), pois correspondem aos dois casos extremos de degradação física do material.

Mediram-se as curvas de retenção da rocha e do material destruído sujeitos a vários ciclos de secagem-molhagem, constatando-se que a curva para a marga se altera com a acumulação de ciclos, devido à degradação física do material (Cardoso *et al.* 2010). Os pontos experimentais referentes ao primeiro ciclo de secagem-molhagem (antes da degradação) apresentam-se na Figura 2. As curvas foram ajustadas com a expressão de Van Genuchten (1980):

$$S_r = \left[1 + \left(\frac{s}{P} \right)^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (1)$$

onde S_r é o grau de saturação, s é a sucção e P e λ são parâmetros determinados por ajuste numérico e cujos valores obtidos se apresentam na Figura 2.

O fenómeno de degradação das margas apresentado na Figura 1 para alguns fragmentos é tanto mais intenso quanto mais seco estiver o material antes da molhagem. O mesmo acontece com a variação de volume na molhagem (expansão), medida em ensaios de expansibilidade. Estes ensaios foram realizados em discos de marga (3 cm de diâmetro e 1 cm de altura) com sucções iniciais de 4,8 e 11,0 MPa, que foram saturados confinados lateralmente e sob tensões verticais de 50 kPa, 160 kPa e 290 kPa (Cardoso, 2009). As deformações volumétricas medidas apresentam-se na Figura 3 (designadas por "ensaio"), onde os valores positivos correspondem a expansão. Constata-se que a amplitude destas deformações depende da sucção inicial e da tensão de confinamento sob a qual se procedeu à saturação. Com estes valores foi possível determinar um valor médio para o índice de expansibilidade elástico κ_s ($\kappa_s=0,020$) definido pela deformação volumétrica:

$$\delta \varepsilon_{vol} = \frac{\kappa_s}{1+e} \ln \frac{s_f}{s_i+0,1} \quad (2)$$

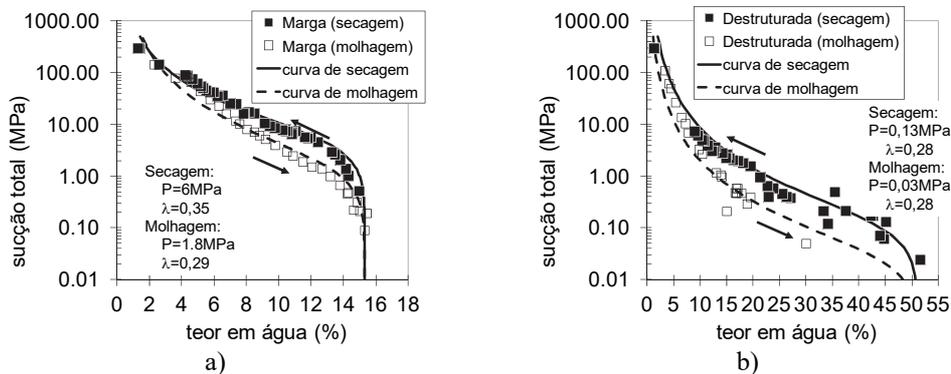


Fig. 2 – Curvas de retenção para um ciclo de secagem-molhagem ajustadas com a Eq. 1: a) marga (adaptado de Cardoso *et al.* 2012); b) material destruturado.

onde e é o índice de vazios e s_i e s_f são as sucções inicial e final (em MPa), respectivamente. Foram realizados ensaios semelhantes em provetes de material destruturado saturado após secagem em ambiente de laboratório tendo-se obtido $\kappa_s = 0,008$.

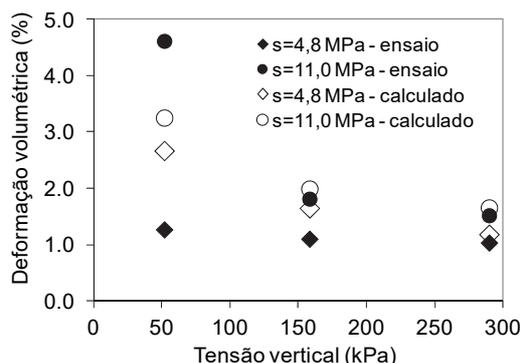


Fig. 3 – Deformações volumétricas medidas nos ensaios de expansibilidade das margas e calculadas considerando a Eq. 3 para as tensões efectivas (adaptado de Cardoso *et al.* 2013).

Com os dados destes ensaios foi possível ajustar a lei para as tensões efectivas proposta por Alonso *et al.* (2010):

$$p' = p + sS_r^\alpha \quad (3)$$

que será necessária para a definição do modelo constitutivo para as margas que se apresenta posteriormente.

Na Eq. 3, p' e p são a tensão isotrópica efectiva e a tensão isotrópica total de compressão, respectivamente, s é a sucção, S_r é o grau de saturação e α é uma constante do material. A constante α explica-se pela necessidade de corrigir o grau de saturação, para não contabilizar a água adsorvida, pois esta não varia na secagem, e logo não provoca alterações volumétricas. Considera-se assim apenas a sucção capilar e $\alpha=1$ para um material granular, como uma areia ou um silte, porque não há água adsorvida, e neste caso a Eq. 3 transforma-se na equação de Bishop para tensões efectivas.

Sendo válida a Eq. 3, esta pode ser usada para calcular variações de volume devidas a variações de tensão ou de sucção, usando para isso um parâmetro único de compressibilidade, C (índice de

compressibilidade). As constantes α e C podem então ser calculadas considerando os ensaios de expansibilidade apresentados, através de:

$$\delta\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta e}{1+e} = \frac{-C \log \frac{p'_f}{p'_i}}{1+e} \quad (4)$$

onde p'_i é a tensão média de compressão efectiva inicial (antes da molhagem, com grau de saturação correspondente à sucção no material, obtido com a curva de retenção) e p'_f é o valor final, considerando que o material ficou completamente saturado na molhagem (equivalente à equação de Terzaghi para as tensões efectivas). Estando as amostras confinadas lateralmente, para o cálculo da tensão média de compressão considerou-se $K_0=0,5$. Obteve-se $C= 1,75$ e $\alpha= 4,56$ (Cardoso, 2009) por ajuste numérico, de modo a minimizar o erro das deformações volumétricas (valores calculados na Figura 3, designados por "calculado"). O valor de α está no intervalo de valores obtidos por Alonso *et al.* (2010) para materiais com grande percentagem de argila. Admite-se que estes parâmetros e que a Eq. 2 são válidos independentemente do intervalo de tensões e de sucções considerado.

Foram também realizados vários ensaios edométricos no material destruturado e em provetes de rocha. Os ensaios no material destruturado consistiram em aumentar a tensão após consolidação até atingir 1 MPa, seguida de descarga (Cardoso, 2009). Nos ensaios de provetes de rocha onde foram aplicadas trajectórias de carregamento incluindo ciclos de carga-descarga, antes ou após molhagem com saturação completa (Cardoso, 2009), a saturação foi conseguida por submersão em água destilada por pelo menos 48h, antes de prosseguir o carregamento. Admitiu-se que este período seria suficiente para saturar as amostras devido à sua dimensão relativamente reduzida. Estes ensaios permitiram compreender melhor o fenómeno de degradação na molhagem dos fragmentos e obter os parâmetros necessários para a definição de um modelo constitutivo para as margas. O Quadro 1 sintetiza os ensaios efectuados nos provetes de rocha, descrevendo as respectivas trajectórias de carregamento.

Quadro 1- Ensaios edométricos realizados em provetes de marga.

Ensaio	Trajectória de carregamento
Ensaio 1	s= 0 MPa (saturado) aplicada sob tensão vertical de 200kPa, constante, e sem ciclos de carga-descarga. Aumento da tensão vertical até $\sigma_v= 7$ MPa seguido de descarga.
Ensaio 2	s= 124 MPa (sucção máxima) constante e sem ciclos de carga-descarga. Aumento da tensão vertical até $\sigma_v= 7$ MPa seguido de descarga.
Ensaio 3	s= 124 MPa constante e 3 ciclos carga-descarga. Tensão vertical de 2 MPa seguida de descarga, recarga até 4 MPa seguida de descarga e recarga novamente até 4 MPa, onde se efectuou a saturação final, seguida de descarga.
Ensaio 4	s= 124 MPa constante e 4 ciclos carga-descarga. Tensão vertical de 2 MPa seguida de descarga, recarga até 4 MPa seguida de descarga e recarga até 7 MPa, onde se efectuou a saturação final, seguida de descarga.
Ensaio 5	s= 0 MPa aplicada sob tensão de 50kPa, constante, seguida de 3 ciclos carga-descarga. Tensão vertical de 2 MPa seguida de descarga, recarga até 4MPa seguida de descarga e recarga até 7 MPa, seguida de descarga.

As curvas medidas nos vários ensaios apresentam-se na Figura 4. Nos ensaios onde a submersão foi efectuada sob tensão vertical baixa (ensaios 1 e 5, à esquerda) observou-se empolamento, o que é explicado pela natureza expansiva das margas. Nos ensaios onde se saturou o material sob tensão elevada (ensaios 3 e 4, à direita) observou-se colapso, aumentando muito o declive da curva de expansão. É de notar que em todos os provetes se considera tensões totais e não tensões efectivas,

tal como usual nos solos não saturados (Nuth e Laloui, 2007), já que a sucção é considerada à parte como outra variável de tensão.

Os valores dos índices de compressibilidade C_c e de expansibilidade ou recompressibilidade C_s apresentam-se no Quadro 2 tendo sido determinados da forma usual. Este quadro também inclui os valores determinados para a amostra destruturada. Como esperado, C_c é maior para o material saturado do que para o material com sucção $s = 124$ MPa porque a rigidez aumenta com a secagem do material. Os valores medidos no ensaio da amostra destruturada são maiores do que os medidos nos vários ensaios dos provetes do material estruturado, tal como descrito por Leroueil e Vaughan (1990), por exemplo.

Nos solos, considera-se normalmente que o comportamento é elástico na descarga-recarga, e portanto o índice de expansibilidade-recompressibilidade, C_s , é constante. Normalmente, também se considera que a compressibilidade elástica não depende da sucção (Alonso *et al.*, 1990). Tal não se verifica para as margas estudadas pois este valor depende da sucção e da história do carregamento. Tal como no Quadro 2 e mostrado na Figura 5, C_s é superior nos ensaios saturados que nos ensaios com $s = 124$ MPa, e aumenta com o número de ciclos aplicados sob sucção constante (ensaio 1 e 5, com $s = 0$ MPa, saturados, e ensaios 2, 3 e 4, com $s = 124$ MPa). Também se verifica que depende da história do carregamento, pois o seu valor medido na descarga final saturada é maior se os ciclos anteriores forem aplicados no material não saturado do que no material saturado (ensaio 4 e 5). Este comportamento é típico de materiais evolutivos (Cafaro e Cotecchia, 2001; Alonso e Alcoverro, 2002; Gullà *et al.*, 2006), ou seja, que sofrem alterações estruturais irreversíveis devido a aplicação de tensão e de sucção.

Uma explicação possível para este comportamento considera a existência de minerais expansivos envolvidos por minerais cimentícios que resultam da diagénese da rocha. Estes últimos podem ser interpretados como ligações (bonds), que conferem resistência e rigidez ao material, e que também restringem as variações de volume dos minerais argilosos. Estas ligações rompem-se durante a aplicação dos ciclos de carga-descarga e pelo aumento de volume dos minerais argilosos expansivos na molhagem. O primeiro caso é o que acontece quando os ciclos são aplicados sob sucção constante, pois a rigidez diminui devido à perda dessas ligações. O segundo caso acontece quando se molha o material antes ou após a aplicação dos ciclos. Durante os ciclos há rotura progressiva das ligações, com conseqüente libertação dos movimentos dos minerais argilosos, pelo que os efeitos devidos ao seu aumento de volume na molhagem são tanto mais marcados quanto maior for o número de rotura de ligações, ou seja, quanto maior for o número de ciclos aplicados (Cafaro e Cotecchia, 2001; Alonso e Alcoverro, 2002; Gullà *et al.*, 2006). Por esse motivo é que C_s medido após a saturação aumenta com número crescente de ciclos.

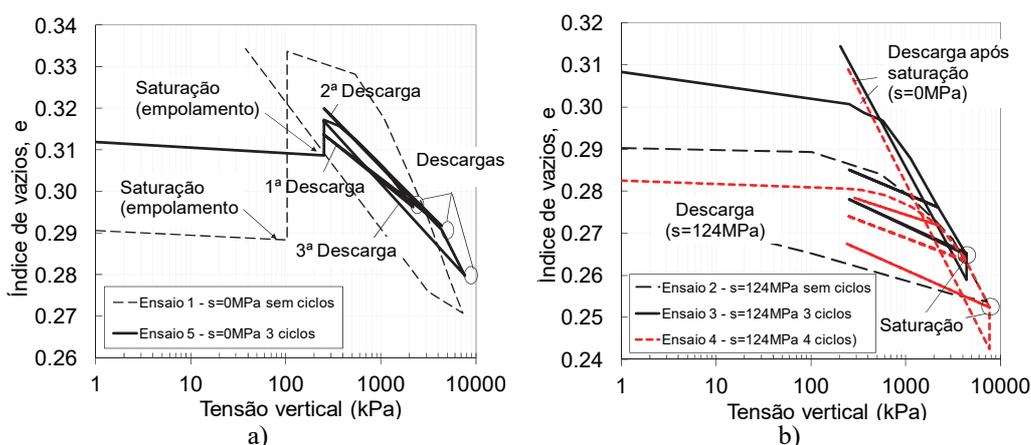


Fig. 4 – Curvas de compressibilidade das margas medidas nos vários ensaios edométricos: a) $s = 0$ MPa; b) $s = 124$ MPa.

Quadro 2 - Índice de compressibilidade e de recompressibilidade medidos nos ensaios.

Ensaio	C_c	C_s 1ª descarga	C_s 2ª descarga	C_s 3ª descarga	C_s 4ª descarga
Ensaio 1 s= 0 MPa	0,057 (sat)	0,028 (sat)			
Ensaio 2 s= 124 MPa	0,040	0,006			
Ensaio 3 s= 124 MPa, 3 ciclos	0,038	0,009	0,011	0,042 (sat)	
Ensaio 4 - s= 124 MPa, 4 ciclos	0,042	0,007	0,008	0,010	0,045 (sat)
Ensaio 5 - s= 0 MPa, 3 ciclos	0,046 (sat)	0,019 (sat)	0,023 (sat)	0,025 (sat)	
Material destruturado	0,325	0,078			

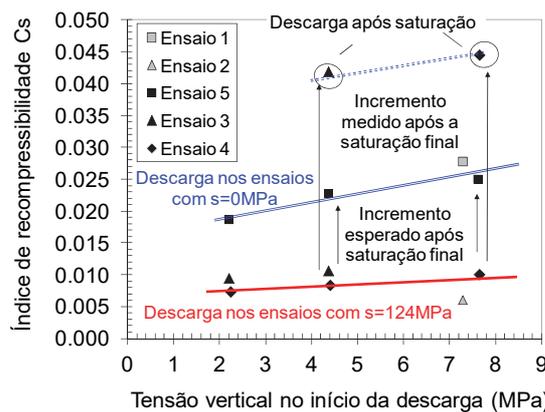


Fig. 5 – Índices de recompressibilidade medidos nos vários ensaios e sua comparação para ilustrar o comportamento evolutivo das margas (adaptado de Cardoso *et al.* 2013).

Com base nos ensaios edométricos foi possível determinar os parâmetros do modelo Barcelona Basic Model, BBM (Alonso *et al.* 1990), que se transforma no modelo Cam Clay modificado no caso saturado. As constantes do BBM apresentam-se no Quadro 3 e são: (i) o índice de expansibilidade elástica para variações de sucção κ_s , já definido, (ii) o índice de compressibilidade elástica para variações de tensão média de compressão, κ (valor médio dos ensaios, já que depende da história do carregamento); (iii) o índice de compressibilidade elastoplástico para variações de tensão média de compressão para o caso saturado, $\lambda(0)$; (iv) os parâmetros r e β necessários para definir o índice de compressibilidade elastoplástico para variações de tensão média de compressão para o caso não saturado (s é a sucção), dado por:

$$\lambda(s) = \lambda(0) \left[(1-r)e^{-\beta s} + r \right] \quad (5)$$

e (v) os parâmetros para a definição da curva de cedência LC (*loading collapse*):

$$\frac{p_0}{p^c} = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (6)$$

onde p^c é a tensão de referência e p_0^* e p_0 são as tensões isotrópicas de compressão de cedência para o caso saturado e não saturado, respectivamente. Neste modelo as tensões definem-se como *net mean stress*, cuja tradução para português poderá ser tensão média útil (Maranha das Neves, 2016), que no caso não saturado correspondem à tensão total à qual se subtrai a pressão atmosférica. Neste artigo será designada simplesmente por tensão. Tal como antes, para o cálculo da tensão média de compressão a partir da tensão aplicada no ensaio edométrico admitiu-se $K_0 = 0,5$ por simplificação. O BBM foi usado para estudar o mecanismo de fendilhação das margas na molhagem, recorrendo a um programa de cálculo comercial, mas para o modelo das margas compactadas será usado um modelo que considera a degradação deste material. Este modelo precisará também dos dados do material destruturado, que também se incluem no Quadro 3 e foram determinados por Cardoso (2009). Ambos os modelos são descritos em seguida.

Quadro 3 - Parâmetros de calibração do BBM para as margas e para o material destruturado, usado no Code Bright para compreender a fendilhação.

	Margas	Material destruturado
$\lambda(0)$	0,027	0,120
r	0,65	--
β	0,05 MPa ⁻¹	--
κ	0,007	0,030
κ_s	0,020	0,008
p_0^*	0,858 MPa	--
p_c	0,280 MPa	--

3 – MECANISMO DE DEGRADAÇÃO FÍSICA DOS FRAGMENTOS NA MOLHAGEM

Numa primeira etapa procurou-se compreender o mecanismo de fendilhação, ou de degradação física, observado durante a molhagem de um fragmento, apresentado antes na Figura 1. Este mecanismo foi investigado numericamente utilizando o programa de elementos finitos Code Bright (Olivella *et al.* 1996), que efectua uma análise hidro-mecânica acoplada e admitindo que o solo é um meio poroso deformável (UPC-DLT, 2002). Para modelo constitutivo adoptou-se o BBM para poder reproduzir as variações volumétricas devidas a variações de sucção (parâmetros no Quadro 3). Para a percolação de água em condições não saturadas foi adoptada a lei de Darcy generalizada. Para o cálculo da evolução do grau de saturação na molhagem utilizou-se a expressão de Van Genuchten (Eq. 1) para definir a curva de retenção para o material marga (parâmetros na Figura 2.a). Foi necessário incluir o declive da linha de estados críticos no plano p:q ($M = 1,0$, um valor usual), o parâmetro que descreve o incremento da coesão com a sucção, $K = 0,007$, e a resistência à tracção quando o material está saturado $c_0 = 0,4$ MPa. Os dois últimos parâmetros foram definidos com base nos ensaios de compressão diametral descritos detalhadamente por Cardoso (2009). Trata-se de uma análise conceptual deste mecanismo, pois com este modelo não é possível simular a fendilhação mas apenas compreender se se podem desenvolver tensões que expliquem este mecanismo.

A Figura 6 mostra a malha de elementos finitos e as condições de fronteira adoptados na reprodução da degradação de um fragmento de marga (admitido como um cilindro com diâmetro $D = 9$ mm). Como dados iniciais adoptou-se $e = 0,29$ e $s = 10$ MPa. A molhagem foi efectuada da periferia para o centro, impondo-se sucção nula na linha de fronteira. Após uma análise de sensibilidade (Cardoso e Alonso, 2009), para tempo de molhagem adoptou-se 15 minutos.

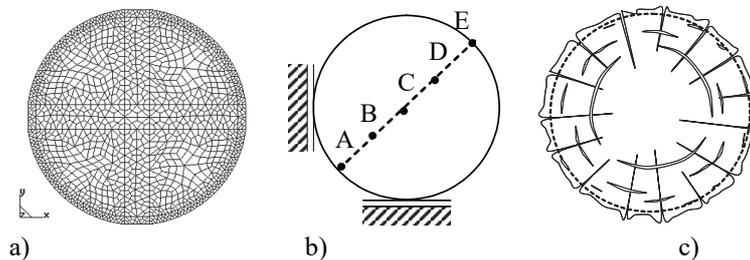


Fig. 6 – Modelo para estudar a degradação de um fragmento (adaptado de Cardoso e Alonso, 2009); a) Malha de elementos finitos; b) Condições de fronteira; c) Representação esquemática da fendilhação.

A Figura 7 mostra a evolução das tensões principais máximas (trações positivas) em vários pontos dentro do fragmento durante a molhagem. Os seus valores, juntamente com a direção identificada através de vectores e com a análise das deformações volumétricas plásticas que se apresentam na Figura 8, permitem prever um padrão para a fendilhação dos fragmentos que se apresenta na Figura 6.c. Trata-se de um padrão idealizado, admitindo que o material é homogéneo (nas margas há estratificação que afecta este padrão). No entanto, o programa não consegue reproduzir esta fendilhação.

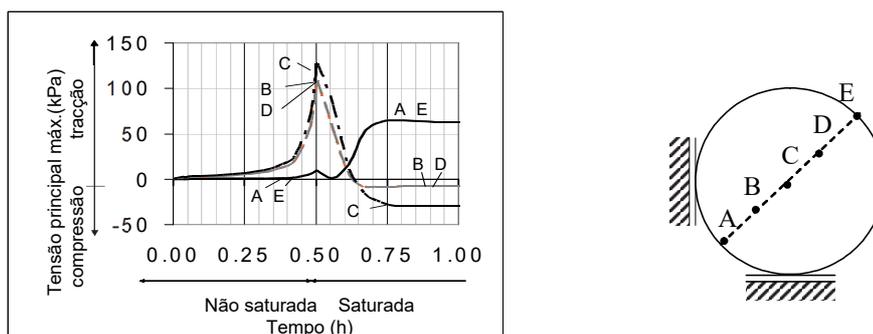


Fig. 7 – Tensões principais máximas dentro do fragmento durante a molhagem (adaptado de Cardoso e Alonso, 2009).

As deformações volumétricas plásticas (Hist_var_2 na Figura 8) e os vectores reproduzindo as tensões principais máximas (tração positiva) apresentam-se na Figura 8 para dois intervalos de tempo distintos (Fig. 8.a para $t=15$ minutos, no final da molhagem da periferia; Fig. 8.b para $t=5$ horas, quando todo o fragmento está saturado).

Durante a molhagem da periferia para o centro constata-se o aparecimento de deformações diferenciais no interior do fragmento (empolamento da camada exterior). Como consequência surgem tensões de tração que explicam a fendilhação. É possível constatar que as deformações avançam da periferia para o centro à medida que o fragmento vai ficando saturado. Há o aparecimento de tensões no interior do fragmento mas o seu padrão evolui no tempo: 15 minutos após o início da molhagem (Fig. 8.a), enquanto o anel da periferia se expande e tende a destacar-se do núcleo, há o aparecimento de trações no núcleo; 5 horas após o início da molhagem (Fig. 8.b), a expansão do núcleo dá origem a trações no anel exterior.

Esta análise explica de uma forma simples a degradação do fragmento, mas não permite a sua incorporação num modelo constitutivo para o material compactado porque não consegue quantificar esta degradação. Por outro lado, fisicamente, o material altera-se significativamente após a primeira

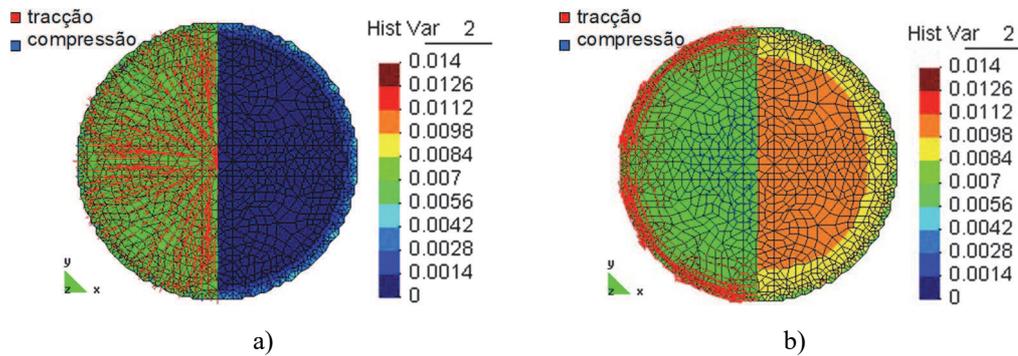


Fig. 8 – Resultados da simulação da degradação de um fragmento (adaptado de Cardoso e Alonso, 2009): a) $t=15$ minutos após a molhagem; b) $t=5$ horas após a molhagem.

molhagem, em termos de geometria e de rigidez. Este não recupera a rigidez (nem a resistência) nem a forma depois de voltar a ser seco para o valor de sucção que tinha inicialmente. O BBM não consegue reproduzir este comportamento porque a rigidez do material (parâmetro $\lambda(s)$) está associada ao grau de saturação e o parâmetro κ não se altera. Surge assim a necessidade de definir um modelo mais adequado para as margas, que se apresenta em seguida.

4 – MODELO CONSTITUTIVO PARA O FRAGMENTO DE MARGA

Numa segunda etapa definiu-se um modelo constitutivo para as margas, designadas por fragmento. O ponto de partida foi o modelo proposto por Alonso e Alcoverro (2002) para rochas argilosas, que é um modelo baseado no Barcelona Expansive Model, BExM (Gens e Alonso, 1992), mas modificado para considerar um parâmetro de dano. O BExM considera dois níveis estruturais designados por microestrutura (minerais argilosos expansivos) e por macroestrutura (matriz argilosa). Para a microestrutura o modelo considera comportamento elástico e está definido em termos de tensões efectivas, já que os minerais estão saturados pois a água encontra-se adsorvida. Para a macroestrutura, o BExM considera o modelo BBM. No entanto, para além de prever que as deformações plásticas podem acontecer devido a endurecimento por aumento da tensão ou por saturação (mobilização da curva *loading collapse* LC), permite também incluir as deformações da microestrutura através de uma função de transferência. Os efeitos irreversíveis na matriz argilosa das deformações da microestrutura são considerados no BExM sempre que se activa a curva de cedência, designada por NL (*neutral line*). Sempre que a trajectória de tensão coincide com a NL as deformações da microestrutura não introduzem deformações plásticas.

O modelo definido para as margas é semelhante ao BExM por ter dois níveis estruturais e um mecanismo de endurecimento com as superfícies de cedência LC e NL, mas são introduzidas alterações para considerar a perda progressiva de ligações. Para este modelo, as deformações das margas $d\epsilon_{frag}$ são obtidas pela equação:

$$d\epsilon_{frag} = d\epsilon_{frag}^p + d\epsilon_{frag}^e \quad (7)$$

onde $d\epsilon_{frag}^e$ são as deformações elásticas e $d\epsilon_{frag}^p$ são as deformações plásticas, definidas pela lei de endurecimento (macroestrutura, $d\epsilon_{frag}^{LC}$) e pela interacção entre os dois níveis estruturais:

$$d\epsilon_{frag}^p = d\epsilon_{frag}^{LC} + d\epsilon_{frag}^e f_{Frag} \quad (8)$$

onde se considera a função de transferência f_{Frag} multiplicada pelas deformações da microestrutura $d\epsilon_{frag}^e$. Cada um dos termos da eq. 8 é explicado detalhadamente em seguida.

A microestrutura corresponde aos minerais argilosos (sob a forma de partículas lamelares empilhadas) e a macroestrutura ao conjunto formado por minerais e as ligações entre si (bonds). A rotura das ligações, ou a perda de estrutura, é considerada através de um parâmetro b . Os valores deste parâmetro variam entre 0 e 1, com $b=0$ quando as ligações estão totalmente destruídas, e $b \leq 1$ ($b=1$ quando se considera que as ligações estão intactas). Deste modo, este parâmetro considera o dano ou rotura de ligações. Do ponto de vista físico, equivale a considerar que as variações de volume dos minerais argilosos (microestrutura) vão ficando cada vez menos restringidas devido à rotura das ligações, e que o comportamento global do material, ao nível da macroestrutura, se aproxima cada vez mais do comportamento do material destruturado. A variação do parâmetro b (proposta por Alonso e Alcoverro, 2002), dada por:

$$b = [b_0 + \Delta b(1 - e^{-as})]e^{-h_1 \int |\delta \varepsilon_v^p|} \quad (9)$$

permite simular perda progressiva de estrutura. Nesta equação b_0 é um parâmetro de referência e considera que o material, na montagem, poderá já ter algum grau de alteração inicial.

A consideração de um parâmetro de dano para simular o comportamento de rochas argilosas foi introduzida por Gens e Nova (1993) e considera que este é consequência da acumulação de deformações volumétricas plásticas $\delta \varepsilon_v^p$. Para as margas estudadas, no entanto, este dano também depende da sucção s e por isso foi necessário introduzir o termo Δb (perda de ligações) e as constantes b_0 , Δb , a e h_1 , que requerem calibração.

A perda progressiva de ligações, analisada antes através dos valores do índice de recompressibilidade (Quadro 2 e Fig. 5) pode ser definida através do incremento do valor do índice de compressibilidade elástica $\kappa_m(b)$, que depende do parâmetro b . Para a sua definição adoptou-se (Alonso e Alcoverro, 2002):

$$\kappa_m(b) = \kappa_{mfd} \left(1 - \frac{b}{b_0} \right) \quad (10)$$

onde κ_{mfd} é a compressibilidade do material destruturado ($\kappa_{mfd} = \kappa = 0,030$, Quadro 3).

Pode agora definir-se o índice de vazios, e_m , que corresponde ao índice de vazios que varia devido à expansão dos minerais argilosos, e por isso é atribuído à microestrutura:

$$e_m = e_{m0} - \kappa_m(b) \times \ln \frac{p'}{p'_{max}} \quad \text{se } p \leq p'_{max} \quad (11)$$

$$e_m = e_{m0} \quad \text{se } p > p'_{max}$$

O índice de vazios e_m depende também do parâmetro b tal como indicado na Eq. 11, e onde e_{m0} é o índice de vazios inicial, p' é a tensão média de compressão efectiva e p'_{max} , definida por ajuste numérico, é também uma tensão efectiva e corresponde ao nível de tensão a partir do qual o confinamento é de tal forma elevado que não poderão ocorrer deformações volumétricas. As tensões efectivas são definidas pela Eq. 3, após o estudo efectuado por Cardoso *et al.* (2013) que mostrou que esta conduzia a melhores resultados para simular o comportamento das margas estudadas.

Finalmente, as deformações $d\varepsilon_m$ são obtidas da forma usual pela equação seguinte:

$$d\varepsilon_m = \frac{de_m}{1+e} \quad (12)$$

que após diferenciação e consideração das equações 9 e 10 (descrição detalhada em Cardoso *et al.* 2013) conduz a:

$$d\varepsilon_m = d\varepsilon_{frag}^e = -\frac{\kappa_m(b)}{1+e} \frac{dp'}{p'} - \frac{\kappa_{mfid}}{1+e} \ln \frac{p'}{p'_{max}} \frac{1}{b_0} \left(bh_1 |d\varepsilon_v^p| + a\Delta b e^{-as} e^{-h_1 \int |d\varepsilon_v^p| ds} \right) \quad (13)$$

O primeiro termo da Eq. 13 corresponde às deformações causadas por variações de tensão e o segundo às deformações causadas por perdas de estrutura, essencialmente na molhagem.

O amolecimento observado nas margas é reproduzido ao nível macrostrutural através do BExM, modificado por Alonso e Gens (1994) para incluir o parâmetro b na definição da tensão de cedência do material saturado p_{ob}^* . Este valor diminui com o aumento da destruturação (diminuição do valor de b) até ao valor mínimo p_{or}^* , que é o valor da tensão de cedência do material destruturado:

$$p_{ob}^* = p_{or}^* (1+b) \quad (14)$$

Considerando a definição de b (Eq. 9), substituindo p_o^* por p_{ob}^* na definição da curva LC (Eq. 6), e considerando a equação de consistência (dedução em Cardoso *et al.* 2013) pode definir-se a lei de endurecimento:

$$d\varepsilon_{frag}^{LC} = -\frac{1}{\frac{(1+b)(1+e)}{\lambda(0)-\kappa} + (b_0 + \Delta b(1-e^{-as}))h_1} \frac{dp_{ob}^*}{p_{ob}^*} - \frac{\frac{p_r^c}{p_{or}^*} \frac{\lambda(0)r\beta}{\lambda(0)-\kappa} \log\left(\frac{p_{or}^*}{p^c}\right) - \frac{\Delta bae^{-a}}{(1+b)}}{\frac{(1+b)(1+e)}{\lambda(0)-\kappa} + (b_0 + \Delta b(1-e^{-as}))h_1} ds \quad (15)$$

Pode agora obter-se as deformações totais plásticas do fragmento, $d\varepsilon_{frag}^P$ que são a soma das deformações devidas a cedência por endurecimento (curva LC) $d\varepsilon_{frag}^{LC}$ (Eq. 13) e as deformações $d\varepsilon_{frag}^e$ (Eq. 11) devidas à expansão dos minerais argilosos, ao nível da microstrutura.

Finalmente, tem que se considerar a interacção entre os dois níveis estruturais, o que se consegue através de uma função de interacção, f_{Frag}

$$f_{Frag} = \frac{d\varepsilon_{frag}^P}{d\varepsilon_{frag}^e} \quad (16)$$

definida tal como no modelo BExM

$$f(p) = f_0 + f_1 \left(1 - \frac{p}{p_{ob}} \right)^n \quad (17)$$

onde f_0 , f_1 e n são constantes. Para as margas é considerada uma função para molhagem (*suction decrease* SD) e outra para secagem (*suction increase* SI), porque a degradação observada na molhagem tem muito mais impacto no comportamento global do que a retracção devido a secagem.

Na Eq. 17, o parâmetro p/p_{ob} (p é o estado corrente de tensão e p_{ob} é a tensão de cedência para uma dada sucção s) considera que as deformações da macrostrutura devidas às variações volumétricas (empolamento ou retracção) ao nível microstrutural dependem da configuração geométrica dos minerais argilosos e das suas ligações no material, e de como os seus movimentos relativos estão ou não impedidos pelo nível de tensão aplicado (explicação detalhada em Alonso, 1998).

As funções de interacção só são activadas se as deformações microstruturais tiverem consequências irreversíveis (deformações plásticas) no comportamento global do material. Estas funções só são activadas para as seguintes situações: (i) na molhagem (*suction decrease*, SD), se a sucção aplicada for inferior a um dado valor mínimo; (ii) na secagem (*suction increase*, SI), se a sucção aplicada for superior a um dado valor máximo. Considera-se que as duas funções coincidem

no espaço (s:p), que se deslocam em conjunto e definem curvas de cedência porque a sua activação implica o aparecimento de deformações volumétricas irreversíveis (Eq. 16). O BExM considera uma única função designada por NL (*neutral line*) mas o modelo ganha flexibilidade se se considerar duas funções (SI e SD) em vez de uma.

O modelo foi calibrado para reproduzir o comportamento das margas, tendo-se obtido os parâmetros do Quadro 4. Como se mostra na Figura 9, o modelo consegue reproduzir de forma satisfatória o comportamento observado para as margas, pois é possível reproduzir o aumento da compressibilidade com o aumento do número de ciclos sob sucção constante, sendo a aproximação melhor para o material com $s=124$ MPa do que para o material saturado. O modelo não consegue reproduzir totalmente a amplitude da degradação final após saturação, o que se pode explicar por limitações do modelo adoptado para o parâmetro b .

Quadro 4 - Parâmetros do modelo para o fragmento de marga.

Microestrutura (material destruturado)	$e_{mi}=0,2$ $\kappa_{mfd}=0,030$ $b_0=0,90, b_i=0,75, h_l=6,0, \Delta b=0,001, a=4,0$ $\alpha=4,56$ e S_r dado pela Eq. 1 (constantes da Fig 2.b)
Macroestrutura (BBM, parâmetros do Quadro 3)	$e_M=e_i-0,02$ com e_i o índice de vazios inicial em cada teste $\lambda(0)=0,027, r=0,65, \beta=0,05\text{MPa}^{-1}, \kappa=0, \kappa_s=0$ $p_{0b}^*=858\text{kPa}, p^c=280\text{kPa}$
Funções de interacção f_{frag}	molhagem SD: $f_0=-5,0, f_1=7,0, n=1,0$ secagem SI: $f_0=0,8, f_1=0,0, n=1,0$

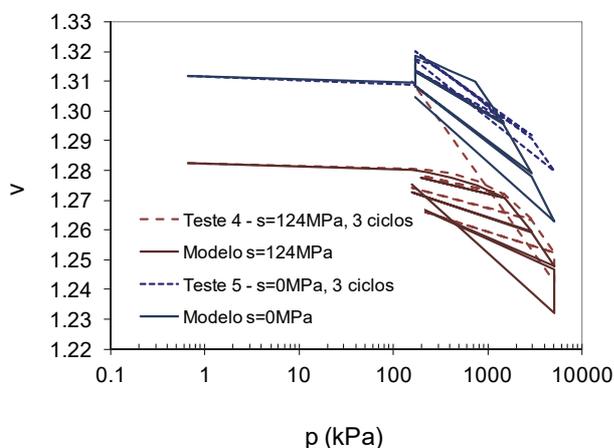


Fig 9 - Resultados da aplicação do modelo constitutivo definido para o fragmento de marga para os testes 4 e 5, onde se aplicam ciclos sob sucção constante.

5 – MARGAS COMPACTADAS E O SEU COMPORTAMENTO HIDRO-MECÂNICO

Após a caracterização do comportamento do fragmento de marga pode então proceder-se à apresentação do comportamento do conjunto de fragmentos que constituem as margas compactadas. Os provetes ensaiados foram preparados com fragmentos com granulometria uniforme (diâmetro $4,75 \text{ mm} < D \leq 9 \text{ mm}$), com índice de vazios $e = 1,078 \pm 0,005$ e teor em água $w = 15\% \pm 2\%$ (próximo do valor observado *in situ*). Optou-se por esta distribuição granulométrica para conseguir compreender melhor os fenómenos físicos envolvidos na degradação do material. A compactação

foi efectuada por vibração (detalhes em Cardoso, 2009). Nestes provetes foram efectuados ensaios para medição da permeabilidade e ensaios edométricos, de modo a caracterizar o seu comportamento hidro-mecânico quando sujeitos a ciclos de molhagem-secagem, pretendendo simular as acções atmosféricas. O Quadro 5 sintetiza os ensaios edométricos realizados. As amostras foram preparadas com 25 cm de diâmetro e 5 cm de altura. A saturação foi efectuada por submersão durante 48h e a sucção foi aplicada por equilíbrio de vapor, tanto para secagem para $s=240$ MPa, como para molhagem parcial, onde se diminuiu a sucção sem atingir a saturação, de forma lenta e controlada (Cardoso, 2009). O facto de usar a técnica de equilíbrio de vapor, apesar de ser um processo lento, assegura que a secagem ou molhagem é feita de forma homogénea.

Nos ensaios edométricos observou-se a evolução de um comportamento típico de enrocamentos (quando ainda não há degradação dos fragmentos) para um comportamento típico de materiais argilosos (após haver degradação). A Figura 10 mostra um exemplo desta evolução, em fotografias tiradas em provetes U e US (ver Quadro 5) preparados com fragmentos com o teor em água próximo do valor *in situ*, os quais foram sujeitos a ensaios edométricos onde a tensão vertical foi aplicada até um dado valor antes de desmontar a amostra. O objectivo destes ensaios foi analisar as alterações estruturais devidas ao aumento de tensão vertical, aplicada sem ou com saturação total. As amostras foram denominadas por: (i) amostra U-50kPa, com o teor de água da compactação (sucção $s_0=2$ MPa) e sujeita à tensão vertical $\sigma_v=50$ kPa; (ii) amostra US-50kPa, saturada após a compactação e sujeita a $\sigma_v=50$ kPa; (iii) amostra U-1000kPa, com o teor de água da compactação e sujeita à tensão vertical $\sigma_v=1000$ kPa; e (iv) amostra US-1000kPa, saturada após a compactação e sujeita à tensão vertical $\sigma_v=1000$ kPa.

O mecanismo de degradação é visível nas fotografias da Figura 10, onde se assinalam os vazios com a cor branca para serem visíveis mais facilmente. É possível verificar que a geometria dos fragmentos é afectada significativamente pela molhagem, e em particular após ser aplicado aumento

Quadro 5- Ensaios edométricos realizados em provetes de margas compactadas.

Ensaio	Trajectória de carregamento
U	$s_0=2$ MPa constante (correspondente ao teor em água <i>in situ</i>). Aumento da tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa seguido de descarga.
US	$s=0$ MPa constante (saturado sob tensão vertical $\sigma_v=50$ kPa). Aumento da tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa seguido de descarga.
UD1	Secagem para $s_1=230$ MPa (sob tensão vertical $\sigma_v=50$ kPa). Mantendo s constante, aumento da tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa e restante trajectória na Figura 13.
UD1-2 e UD1-3	Idênticos ao teste UD1, mas após secagem para $s=230$ MPa foi efectuada molhagem parcial por equilíbrio de vapor para $s_2=39$ MPa e $s_3=12$ MPa, respectivamente, antes de prosseguir com o aumento de tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa. Trajectórias na Figura 13.
UD2	Secagem para $s_2=39$ MPa (sob tensão vertical $\sigma_v=50$ kPa). Mantendo s constante, aumento da tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa seguido de descarga.
UD3	Secagem para $s_3=12$ MPa (sob tensão vertical $\sigma_v=50$ kPa). Mantendo s constante, aumento da tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa seguido de descarga.
UWD1	Saturação seguida de secagem para $s_1=230$ MPa (sob tensão vertical $\sigma_v=50$ kPa). Mantendo s constante, aumento da tensão vertical $\sigma_v=1000$ kPa e restante trajectória na Figura 13.
UWD1-2 e UWD1-3	Idênticos ao teste UWD1, mas após secagem para $s=230$ MPa foi efectuada molhagem parcial por equilíbrio de vapor para $s_2=39$ MPa e $s_3=12$ MPa, respectivamente, antes de prosseguir com o aumento de tensão vertical até $\sigma_v=1000$ kPa. Trajectórias na Figura 13.

da tensão vertical. Este comportamento é coerente com a perda de estrutura dos fragmentos de marga, discutida nas secções anteriores. As variações volumétricas dos fragmentos são acompanhadas de perda de rigidez, pelo que os fragmentos perdem a forma e invadem os vazios entre si. Neste caso, um meio inicialmente heterogéneo e com duas porosidades distintas, a dos vazios e a dos fragmentos, vai-se transformando gradualmente num meio homogéneo com uma porosidade única semelhante a um material argiloso.

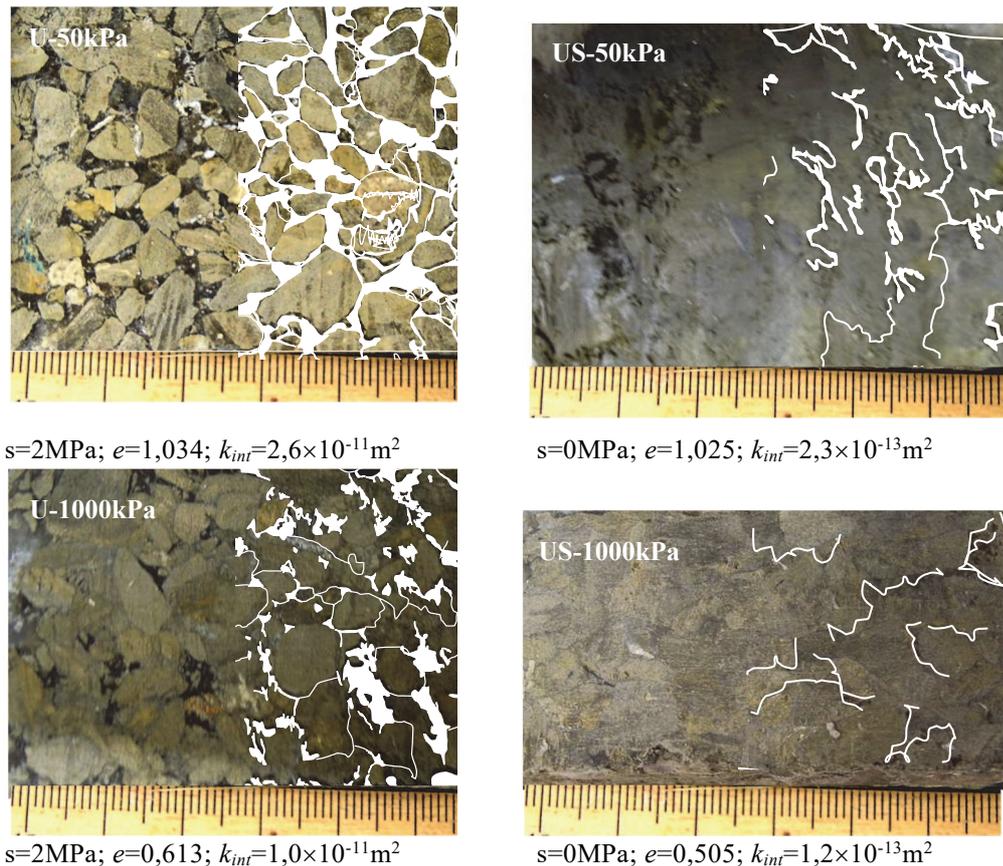


Fig. 10 – Degradação dos fragmentos para diferentes trajetórias de carregamento ($e_{inicial}=1,078\pm 0,005$).

Os vazios entre os fragmentos são muito maiores do que os vazios da rocha, por isso a medição das variações de permeabilidade fornece essencialmente indicação sobre a variação dos vazios de maiores dimensões. A permeabilidade foi medida nos dois ensaios durante as várias etapas de carregamento para confirmar a redução do índice de vazios observada. Nas amostras saturadas foi medida a permeabilidade saturada usando água destilada. Nas amostras não saturadas, a permeabilidade foi medida com ar, pois se se tivesse usado água esta iria provocar a degradação dos fragmentos e alterar os resultados. Foi utilizada a permeabilidade intrínseca k_{int} :

$$k_{int} = \frac{k\mu_l}{\gamma_l} \quad (18)$$

para ser possível comparar os valores das permeabilidades medidas com dois fluidos diferentes. Nesta equação, k é a permeabilidade medida e μ_l é a viscosidade e γ_l é o peso volúmico do fluido usado na medição (a 20°C, $\mu_l = 1 \times 10^{-9}$ MPa.s e $\gamma_l = 9,8 \approx 10$ kN/m³ para a água e $\mu_l = 1,81 \times 10^{-11}$ MPa.s e $\gamma_l = 12,05 \times 10^{-3}$ kN/m³ para o ar).

Os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade intrínseco de cada amostra apresentam-se também na Figura 10, assim como o índice de vazios para a respectiva etapa de carregamento. Tal como esperado, a permeabilidade diminui com o aumento da tensão vertical (comparação entre as amostras U-50kPa e U-1000kPa, e US-50kPa e US-1000kPa), mas este decréscimo é mais acentuado - cerca de duas ordens de grandeza - após a saturação (comparação entre as amostras U-50kPa e US-50kPa, e U-1000kPa e US-1000kPa). Tal está concordante com as fotografias da Figura 10, pois com a molhagem e com o aumento de tensão vertical os fragmentos perdem a sua geometria, tendendo a ocupar os espaços vazios entre si e diminuindo a permeabilidade.

Os fragmentos das amostras não saturadas aparentemente não perdem rigidez, mas rompem-se, alterando a significativamente a curva granulométrica do material. A Figura 11 mostra as curvas granulométricas dos ensaios U-1000, UD1-1000 e UWD1-1000 e inclui as curvas granulométricas do material na montagem e após vibração, apenas para comparação. Consta-se que a rotura de partículas é maior quando estas estão mais húmidas, ou seja, para a sucção mais baixa estudada (comparação U e UD1), e que também aumenta se se aplicar um ciclo molhagem-secagem antes de prosseguir com o carregamento (comparação UD1 e UWD1). Este comportamento é típico de materiais tipo enrocamento, observado em ensaios laboratoriais e em aterros e barragens (Marsal, 1967, Fumagalli, 1969, Nobari e Duncan, 1972, Marsal, 1973, Veiga Pinto, 1983, Fukumoto, 1992, Oldecop, 2000), e pode ser explicado por um mecanismo de rotura progressiva controlada pela humidade relativa (ou sucção) (Oldecop e Alonso, 2001, 2007), que se identifica pela ocorrência de deformações ao longo do tempo, ou seja, por fluência. Para as margas estudadas, mesmo nos ensaios onde os provetes não foram saturados antes da secagem, para além da rotura dos fragmentos também deve ocorrer a sua degradação física (rotura das ligações internas, já discutido). No entanto, não é fácil distinguir os dois fenómenos, e por isso a análise será efectuada considerando apenas que ocorre rotura dos fragmentos.

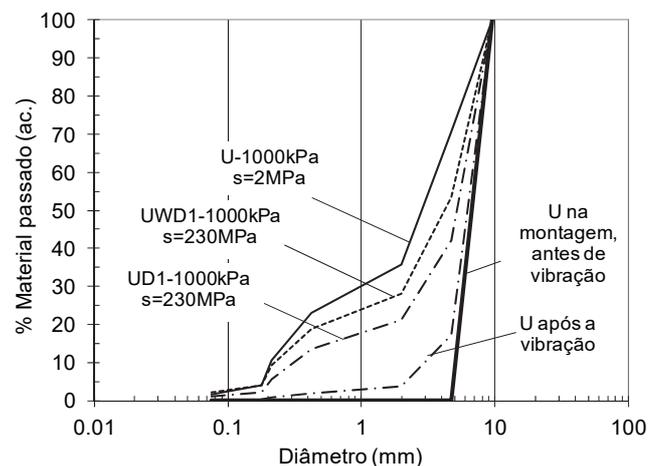


Fig. 11 - Curvas granulométricas na montagem e para vários ensaios.

As semelhanças entre o comportamento das margas compactadas não saturadas e o comportamento típico de materiais tipo enrocamento foram estudadas analisando os coeficientes de fluência λ' :

$$\lambda' = \frac{d\varepsilon}{d(\ln t)} \quad (19)$$

onde ε é a extensão vertical e t o tempo correspondentes a cada etapa de carregamento nos ensaios US, U, UD1, UD2 e UD3 (Quadro 5).

A Figura 12 mostra os valores de λ^t calculados para cada etapa de carga (σ_v constante) de cada ensaio. Para cada sucção é possível identificar tendências, semelhantes às observadas para materiais tipo enrocamento por Oldecop e Alonso (2001), em que a fluência aumenta com o aumento de tensão e diminui com o aumento da sucção (ou aumenta com a humidade). No entanto, contrariamente ao que se observa em ensaios de fragmentos de rochas não evolutivas, para as margas esta tendência não é seguida no ensaio saturado US porque λ^t é praticamente constante. Este comportamento é típico de materiais argilosos, o que mostra que, para sucções inferiores a cerca de 2 MPa (valor exacto não determinado) ocorre a transição de comportamento entre um material tipo enrocamento para um material argiloso. O facto de se dar esta transição de comportamento indica que modelos para materiais tipo enrocamento são inadequados para simular o comportamento das margas compactadas.

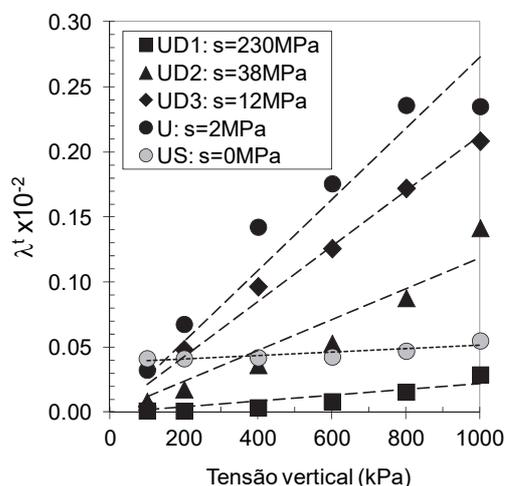


Fig. 12 - Coeficientes de fluência calculados para cada etapa de carga e para cada ensaio em que foi aplicada secagem para sucções diferentes sem nunca ter havido saturação prévia.

Os ensaios UD1, UD1-2 e UD1-3 (secagem para $s_1 = 230$ MPa no ensaio UD1, seguida de molhagem parcial para $s_2 = 39$ MPa no ensaio UD1-2 ou para $s_3 = 12$ MPa no ensaio UD1-3) foram realizados para obter os parâmetros de calibração do modelo BBM, por reflectirem o comportamento do material sem ser sujeito a ciclos de molhagem-secagem. Foi necessária a secagem inicial de todos os provetes para 230 MPa para assegurar que a curva LC era a mesma para todos os ensaios, para assim poder calibrar o BBM. As trajectórias dos vários ensaios apresentam-se na Figura 13 juntamente com as curvas de compressibilidade. Em todos estes ensaios, depois do tratamento inicial e atingida a sucção pretendida e mantida esta constante, sob a tensão vertical $\sigma_v = 50$ kPa, foi procedido ao aumento de tensão vertical até 1000 kPa seguido de descarga até 600 kPa. Sob esta tensão vertical o provete foi saturado ($s = 0$ MPa) e procedeu-se ao aumento da tensão vertical para $\sigma_v = 1000$ kPa, seguido de descarga para 50 kPa. Complementarmente realizaram-se ensaios semelhantes a estes, mas designados por UWD em vez de UD, em que inicialmente (sob tensão vertical $\sigma_v = 50$ kPa) os provetes foram saturados antes de serem sujeitos a secagem para $s_1 = 230$ MPa. Para o ensaio UWD1 o carregamento prosseguiu tal como o efectuado para o ensaio UD1.

Para os ensaios UWD1-2 e UWD1-3, os provetes foram sujeitos a molhagem parcial para $s_2= 39$ MPa (UWD1-2) ou $s_3= 12$ MPa (UWD1-3) antes de prosseguir o carregamento (tal como para os ensaios UD1-2 e UD1-3, respectivamente).

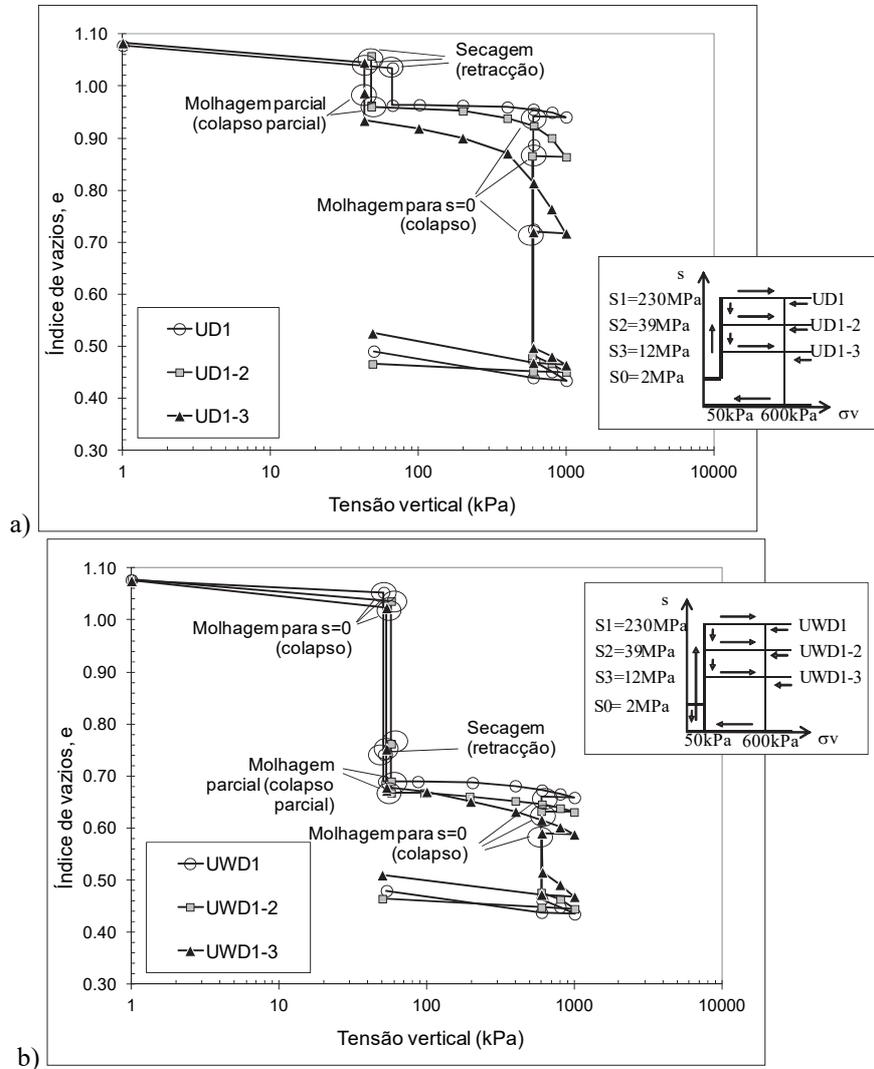


Fig. 13 - Curvas de compressibilidade e trajectórias de carregamento para o conjunto de ensaios: a) UD; b) UWD.

Pela comparação entre os ensaios UD e UWD da Figura 13 é possível verificar que há alterações significativas do comportamento após o material ter sido sujeito ao ciclo de molhagem secagem inicial porque a rigidez aumenta. Tal pode explicar-se pelo adensamento provocado pelo colapso na molhagem. Nos ensaios UWD verifica-se que o colapso observado na segunda molhagem, sob 600 kPa, é menor do que o observado na primeira (sob 50 kPa), o que se explica também pelo adensamento sofrido pelo material na primeira molhagem, que o faz perder sensibilidade para molhagens posteriores. Este comportamento também é observado em solos argilosos compactados (Alonso *et al.* 1990, por exemplo), e por isso procedeu-se à calibração do BBM. Os parâmetros de

calibração encontram-se no Quadro 6, tendo sido obtidos considerando apenas os ensaios UD, pois são os que representam o material compactado. Para κ considerou-se o valor médio dos ensaios para as várias sucções. O valor de κ_s foi obtido considerando os valores médios medidos no colapso parcial ocorrido na molhagem parcial, admitindo que as estas deformações seriam reversíveis. Apesar de não se ter aplicado a secagem inicial para $s_1 = 230$ MPa no ensaio US, a degradação observada neste ensaio devido à saturação inicial foi de tal forma significativa que este se comportou como um solo normalmente consolidado (Cardoso, 2009). Por esse motivo, o valor da tensão de cedência para o material saturado, p_o^* foi obtido por calibração da curva LC.

Quadro 6 - Parâmetros de calibração do BBM para as margas compactadas (ensaios UD).

$\lambda(0)$	0,25
r	0,23
β	0,03 MPa ⁻¹
κ	0,006
κ_s	0,008
p_o^*	80 kPa
p_c	47 kPa

No entanto, o BBM tem algumas limitações discutidas por Cardoso e Alonso (2010), tais como: (i) não consegue reproduzir o colapso observado na primeira molhagem (ensaios UWD) já que esta é efectuada sob tensões verticais inferiores à tensão de cedência saturada; (ii) não consegue reproduzir o colapso observado na segunda molhagem porque esta é efectuada sob $\sigma_v = 600$ kPa após descarga depois de ter sido atingida a cedência, pelo que a trajectória está dentro do espaço elástico e por isso o modelo só consegue reproduzir empolamento. O colapso observado explica-se pela forte degradação dos fragmentos causados pela molhagem. Torna-se assim necessário definir um modelo para as margas compactadas que permita considerar esta degradação, como se discutirá em seguida.

6 – MODELO CONSTITUTIVO PARA AS MARGAS COMPACTADAS

Como referido antes, os modelos constitutivos para solos não saturados que existem actualmente não conseguem reproduzir o comportamento do material compactado devido à sua elevada complexidade, nomeadamente colapso na segunda saturação, diminuição da amplitude de colapso após um ciclo de molhagem-secagem e aumento de rigidez observada após vários ciclos de secagem-molhagem. Também não é viável usar um modelo para materiais tipo enrocamento para as margas compactadas porque, apesar de estes modelos conseguirem reproduzir o colapso na molhagem, não conseguem reproduzir a transição do comportamento do material tipo enrocamento para um solo argiloso devido à degradação dos fragmentos.

Pela descrição do comportamento hidro-mecânico do material compactado constata-se que este inicialmente é um conjunto de fragmentos, que quando sujeito a ciclos de molhagem-secagem e de carga-descarga se transforma progressivamente num material homogéneo e com comportamento típico de solos argilosos compactados devido à degradação física dos fragmentos. Antes da degradação dos fragmentos é possível distinguir dois níveis de estrutura: a dos fragmentos, com a sua porosidade, e a do seu conjunto, em que a porosidade é maioritariamente devido ao espaço vazio entre os fragmentos. Tal sugere que se possa usar um modelo que considere a existência destes dois níveis estruturais, tal como o modelo BExM proposto por Gens e Alonso (1992). Este modelo foi testado por Cardoso e Alonso (2010) para reproduzir o comportamento do material, mas sem grande sucesso. Estes autores testaram as características da rocha e do material destruturado para calibração do modelo para a microestrutura, mas nenhuma delas teve sucesso porque não é possível incluir a degradação resultante da primeira molhagem, que altera completamente as características do

material e que se reflecte em molhagens e secagens posteriores. No entanto, o BExM oferece algumas possibilidades de ser adaptado para reproduzir o comportamento do material compactado, porque permite definir modelos diferentes para cada nível estrutural.

O modelo definido para o material compactado considera a existência de dois níveis estruturais, tal como o BExM, sendo o conjunto de fragmentos a macroestrutura, e o fragmento a microestrutura. No entanto, para a microestrutura é adoptado o modelo de comportamento apresentado antes para o fragmento de marga, também ele baseado no BExM. Este modelo permite considerar a degradação dos fragmentos na molhagem, pois este é o aspecto fundamental a considerar no comportamento das margas compactadas. A outra novidade do modelo para as margas compactadas está na definição das funções de interacção entre os dois níveis estruturais, pois há que considerar os efeitos da degradação dos fragmentos no comportamento global do material. Neste caso definiu-se um conjunto de funções a usar antes da primeira saturação do material (como se tratasse de um material tipo enrocamento), e outro após este ter sido sujeito a um ciclo de molhagem-secagem, que é quando os fragmentos sofrem alteração física importante e com efeitos irreversíveis no comportamento do material compactado.

Como se considera o modelo de comportamento das margas como rocha para modelo da microestrutura, que é ele próprio um modelo para materiais com dois níveis estruturais, o modelo adoptado para as margas compactadas considera na realidade três níveis estruturais, correspondentes a: (i) agregado de minerais elementares da rocha marga (partículas argilosas e outros minerais), (ii) fragmento, ou a rocha, que corresponde aos agregados de minerais unidos por um parâmetro de ligação (parâmetro b) que se vai alterando com a degradação física, e (iii) conjunto dos fragmentos, que não têm ligação física entre si e que só são afectados se houver alteração significativa do nível estrutural inferior. Estes três níveis são tratados com um modelo BExM que inclui outro modelo BExM para a microestrutura, modificado para considerar a degradação dos fragmentos descrito antes. A Figura 14 esquematiza o modelo definido, onde também se incluem as funções de interacção definidas agora para o conjunto dos fragmentos, que é o material compactado, e que se denominam por f_{comp} .

A perda de ligações dos fragmentos (dano) também afecta o comportamento do material compactado pois há perda de rigidez para além de haver alterações do rearranjo estrutural. São vários os factores a considerar para definir o mecanismo de interacção entre os fragmentos e o seu conjunto

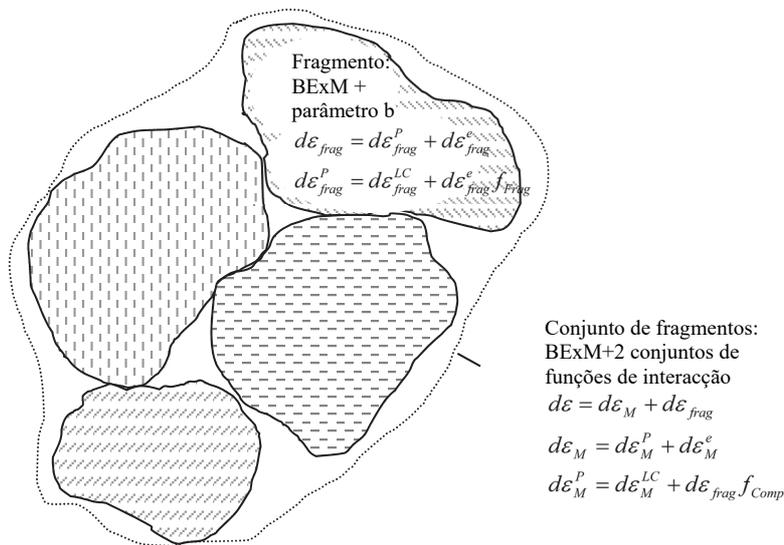


Fig. 14 - Esquema do modelo de comportamento das margas compactadas.

e a sua quantificação não é fácil. Por exemplo, há que considerar a geometria e dimensões dos vazios entre fragmentos, o estado de tensão nos fragmentos e a intensidade da sua degradação dos fragmentos (depende da sucção inicial), todos dependentes da história de carregamento. Do ponto de vista físico não faz sentido introduzir nenhum parâmetro de dano para o material compactado semelhante ao adoptado para o modelo do fragmento porque não há ligações físicas entre os fragmentos. Podia-se pensar noutra definição de dano, mas tal iria complicar desnecessariamente o modelo. Por este motivo optou-se por considerar uma função de interação, f_{comp} adaptável à degradação física sofrida pelo material devido às trajetórias de carregamento a que este é submetido, e que cobre as incertezas associadas aos factores que não são facilmente quantificáveis.

Podemos agora apresentar-se o modelo para o material compactado. As deformações totais $d\varepsilon$ são dadas pela soma das deformações dos dois níveis estruturais: macroestrutura $d\varepsilon_M$ e microestrutura (fragmento) $d\varepsilon_{frag}$:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_M + d\varepsilon_{frag} \quad (20)$$

As deformações da microestrutura (fragmento) foram definidas antes através da Eq. 7 e possuem uma parcela elástica $d\varepsilon_{frag}^e$ (Eq. 13) e outra plástica $d\varepsilon_{frag}^p$ (Eq. 8). Ambas estão identificadas esquematicamente na Figura 15. Simplificadamente, admite-se que os fragmentos no material compactado têm confinamento idêntico ao dos ensaios edométricos usados para a calibração do modelo para a margá. As funções de interação também não se alteraram depois do estudo realizado por Cardoso (2009), onde se verificou que não havia melhoria significativa em alterar as suas constantes de calibração.

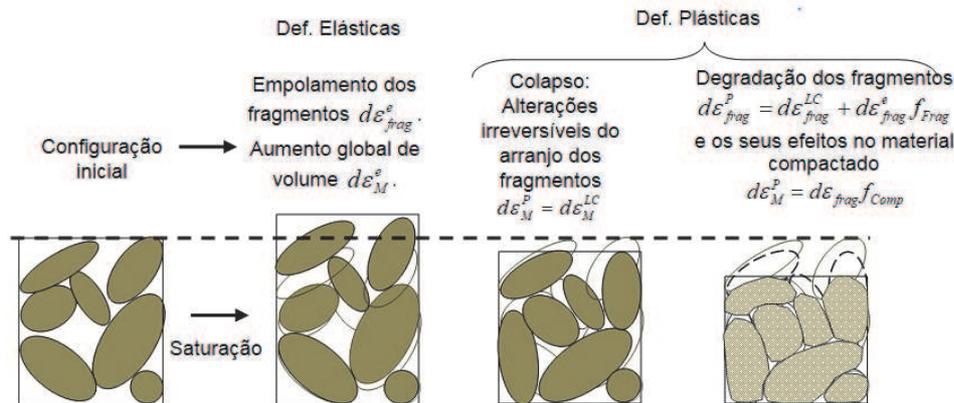


Fig. 15 - Interação entre os fragmentos e o material compactado e correspondência com as deformações consideradas no modelo de comportamento das margas compactadas.

Para o material compactado, as deformações da macroestrutura $d\varepsilon_M$ também têm uma componente elástica $d\varepsilon_M^e$:

$$d\varepsilon_M^e = -\kappa_M \ln \frac{p_f}{p_i} - \kappa_{SM} \ln \frac{s_f}{s_i} \quad (21)$$

que considera variações de tensão ou de sucção, tal como previsto no BBM, e uma plástica $d\varepsilon_M^p$:

$$d\varepsilon_M^p = d\varepsilon_M^{LC} + d\varepsilon_{frag} f_{Comp} = d\varepsilon_M^{LC} + (d\varepsilon_{frag}^e + d\varepsilon_{frag}^p) f_{Comp} \quad (22)$$

Esta última considera dois tipos de deformações, ilustradas na Figura 15: (i) devidas ao rearranjo dos fragmentos sob tensão, que é basicamente o mecanismo de cedência descrito pela curva de cedência LC, $d\varepsilon_M^{LC}$,

$$d\varepsilon_M^{LC} = -(\lambda_M(s) - \kappa_M) \ln \frac{p_f}{p_0} \quad (23)$$

e (ii) devido aos efeitos irreversíveis da degradação física dos fragmentos, definida no BExM através de funções de interacção f_{Comp} entre os dois níveis estruturais. Nestas equações, p_i e p_f são as tensões médias de compressão no início e no final da etapa de carregamento, p_0 é a tensão de cedência para a sucção corrente e s_i e s_f são a sucção inicial e final da etapa de carregamento. $\lambda(0)$, κ e κ_s do material compactado foram substituídos respectivamente por $\lambda_M(0)$, κ_M e κ_{sM} para facilitar a compreensão do modelo.

Conforme se mostrou ao analisar os ensaios UD e UWD, depois de sujeito a um ciclo de molhagem-secagem o material compactado sofre um forte adensamento e perde sensibilidade a mais ciclos. Considera-se assim um conjunto de funções de interacção f_b para ser usado antes de ter ocorrido a primeira saturação (quando os fragmentos estão muito sensíveis), e um conjunto f_{nb} para ser usado depois (quando os fragmentos já sofreram degradação significativa). A transição de comportamento entre um material tipo enrocamento para um material argiloso é assim coberto pela função f_b . A calibração destas funções é muito difícil com base nos dados experimentais, porque há diversos fenómenos a acontecer em simultâneo (rotura e instabilidade dos fragmentos no arranjo estrutural, perda de rigidez e de forma, etc) e portanto estas funções foram calibradas numericamente.

As funções de transferência f_b e f_{nb} são definidas pela Eq. 17 e que só diferem entre si nas constantes de calibração (Quadro 7). Para cada uma há um conjunto de parâmetros que definem a função activada em trajectórias de secagem (*suction increase*, activando a curva de cedência SI, f_{fb} ou f_{inb}) ou a função activada na molhagem (*suction decrease*, activando a curva de cedência SD, f_{Db} ou f_{Dnb}). O facto de haver duas equações diferentes para a função de transferência consoante molhagem ou secagem está descrito por Alonso *et al.* (1999) e é uma modificação do BExM original apresentado por Gens e Alonso (1992) porque há duas curvas activadas pela microestrutura (SI e SD) em vez de uma (NL). Estas funções definem curvas acopladas à curva LC, que quando activadas mobilizam esta curva conduzindo a amolecimento (LC desloca-se para a esquerda) ou a endurecimento (LC desloca-se para a direita). Por exemplo, quando o material colapsa na molhagem a curva correspondente a SD é activada e a LC desloca-se para a direita. Fisicamente significa que há adensamento do material e o tamanho do espaço elástico aumenta. Neste caso f_D é usada para o cálculo das deformações plásticas com a Eq. 22, considerando a degradação dos fragmentos na molhagem (deformações da microestrutura, calculadas com as Equações 7, 8 e 15), e terá que ter sinal negativo para simular colapso. Quando o material é submetido a secagem ultrapassando um dado valor máximo de sucção SI é activada e a C desloca-se para a esquerda (amolecimento). Se houver molhagem após esta secagem poderá haver novo colapso desde que se active SD.

A activação das funções de transferência e o acoplamento à curva LC define o mecanismo de endurecimento (Figura 16). No modelo para as margas compactadas considerou-se que o estado de tensão corrente se encontra sobre as curvas SI e SD e que estas se deslocam em simultâneo, o que equivale a dizer que se admite que qualquer variação de volume dos fragmentos provoca alterações no arranjo global. Também se admitiu que se deslocam em trajectórias de carga e de descarga, mas SI está sempre acima de SD e por isso f_i é que é usada nestes casos. A Figura 16 ilustra como se processa este mecanismo para o ensaio UD1-2.

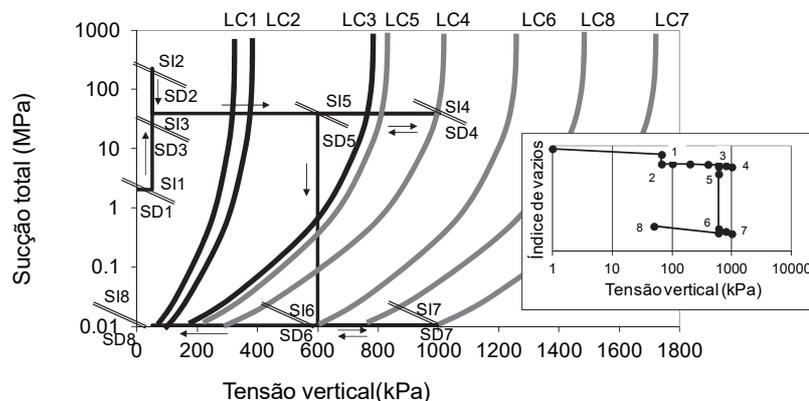


Fig. 16 - Esquema ilustrativo do mecanismo de endurecimento para o ensaio UD1-2.

SD e SI coincidem no ponto 1 ($s_0=2\text{MPa}$) e sobem para o ponto 2 ($s_1=230\text{MPa}$) na secagem. f_{ib} é activada e LC desloca-se para a direita. Em seguida, com a molhagem parcial SD (e SI) descem para o ponto 3 ($s_2=39\text{MPa}$) e LC desloca-se novamente para a direita porque só assim é que se simula adensamento devido a colapso parcial. Este colapso ocorre apesar do empolamento dos fragmentos ($d\varepsilon_{frag} + d\varepsilon_M^e > 0$), porque f_{Db} é activada e é negativa ($d\varepsilon_M^p < 0$). Com o aumento da tensão vertical, quando a LC é cruzada esta move-se para a direita (endurecimento previsto pelo BBM) até ao ponto 4, levando a SI consigo (f_{ib} é activada). Na descarga até ao ponto 5 a LC desloca-se para a esquerda porque SD se desloca sempre com o estado de tensão corrente. Na saturação seguinte, SD e SI descem até ao ponto 6 ($s=0\text{MPa}$) e LC desloca-se para a direita novamente para se conseguir colapso (f_{Db} é activada e é negativa). A partir deste momento admite-se degradação significativa dos fragmentos e passam a utilizar-se as funções f_{Inb} e f_{Dnb} . LC e SI continuam a deslocar-se para a direita até ao ponto 7 durante o incremento da tensão vertical sob sucção constante, e depois LC e SI deslocam-se para a esquerda na descarga, até ao ponto 8. O mecanismo de cedência para os ensaios UWD é semelhante a este e está explicado detalhadamente em Cardoso *et al.* (2013).

Aos parâmetros das curvas de interacção e os restantes parâmetros do modelo apresentam-se no Quadro 7. Para κ_M e κ_{SM} devia-se usar os valores apresentados antes no Quadro 6, no entanto optou-se por se considerar que eram nulos para assim se poder controlar as deformações elásticas do material compactado apenas através das deformações do fragmento e das funções f_{Comp} .

Finalmente, o modelo foi usado para reproduzir de forma aceitável os ensaios do material compactado (Cardoso, 2009). A Figura 17 mostra os resultados para os ensaios UD1-2 e UWD1-2.

Em relação ao ensaio UD1-2 (Fig. 17.a), pode observar-se modelo consegue reproduzir a

Quadro 7 - Parâmetros do modelo para as margas compactadas

Microestrutura (fragmento de margas)	Parâmetros no Quadro 4 $e_m=0,29$
Macroestrutura	$e_M=1,078 - 0,29$ $\lambda_M(0)=0,25, r=0,23, \beta=0,03\text{MPa}^{-1}, \kappa_M=0, \kappa_{SM}=0$ $p_{0b}^*=80\text{kPa}, p^c=47\text{kPa}$
Funções de interacção f_{Comp}	f_b : Antes de haver primeira saturação molhagem SD - f_{Db} : $f_0=-11,0, f_i=8,0, n=1,0$ secagem SI - f_{ib} : $f_0=0, f_i=0, n=1,0$ f_{nb} : Depois de haver primeira saturação molhagem SD - f_{Dnb} : $f_0=-5,0, f_i=8,0, n=1,0$ secagem SI - f_{Inb} : $f_0=-0,5, f_i=0, n=1,0$

retracção e o colapso observados sob a tensão vertical de 50 kPa, e também o colapso na molhagem sob a tensão vertical de 600 kPa. O colapso na molhagem inicial sob 50 kPa no ensaio UWD1-2 (Fig. 17.b) também se consegue reproduzir, assim como a retracção e novo colapso resultante da secagem e molhagem parcial. Isto só é possível por se activou SD, que através de f_{Db} com sinal negativo conseguiu transformar o empolamento dos fragmentos num colapso global. Sob 600kPa ocorreu segundo colapso porque SD foi activada e f_{Dnb} é também negativa.

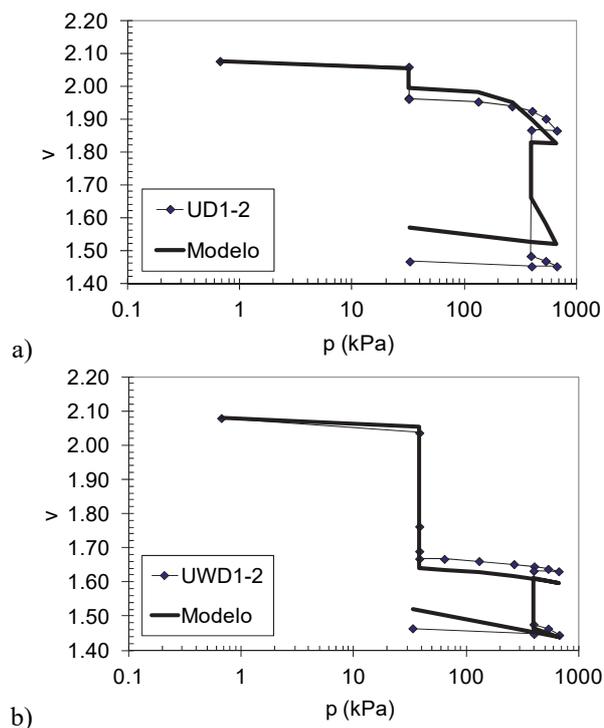


Fig. 17 - Simulação com o modelo para os ensaios: a) UD1-2; b) UWD1-2.

A sobreposição das curvas obtidas numericamente para os ensaios UD1, UD1-2 e UD1-3, e UWD1, UWD1-2 e UWD1-3 apresentam-se na Figura 18 (Fig. 18.a para os ensaios UD e Fig. 18.b para os ensaios UWD). A comparação entre a Figura 18 e a Figura 13 mostra que o modelo consegue reproduzir as deformações de colapso observadas em todas as molhagens, assim como a retracção na secagem. São estas as principais características do comportamento do material compactado, que o modelo consegue reproduzir.

O comportamento complexo das margas compactadas dificulta a tarefa em obter um modelo constitutivo adequado. O modelo desenvolvido é também bastante complexo, mas apresenta a vantagem de se basear no significado físico das deformações observadas neste material, mesmo que apenas simule os efeitos, no comportamento hidro-mecânico do conjunto, da rotura dos fragmentos e seu amolecimento, com invasão dos espaços vazos entre si sem exactamente reproduzir estes fenómenos. Até à data desconhece-se a existência de outros modelos usados para reproduzir este tipo de comportamento, e ainda que possam ser facilmente implementados em programas de cálculo.

O modelo proposto para as margas compactadas necessita de um número considerável de parâmetros. A maior parte pode ser obtida experimentalmente, em ensaios a realizar no material dos fragmentos e no material compactado, estando sintetizados no Quadro 8.

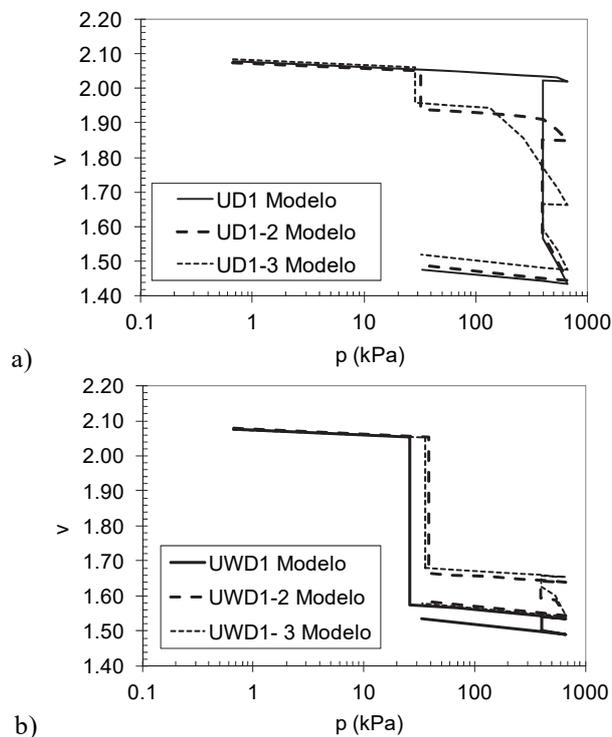


Fig. 18 - Curvas obtidas na simulação para o conjunto de ensaios: a) UD; b) UWD.

Quadro 8 - Ensaio necessários para a calibração do modelo para as margas compactadas.

	Ensaio	Parâmetro
Fragmentos	4 ensaios edométricos onde o incremento de tensão é aplicado sob sucção constante diferente, sendo um deles saturado.	Calibração do <i>BBM</i> : $\lambda(0)$, r , β , p^C e p_0^* Parâmetro b (b_0 , b_i , h_1 , Δb , a) se se aplicarem ciclos de carga-descarga
	2 ensaios de expansibilidade onde a saturação é efectuada para tensões verticais diferentes, para além do ensaio edométrico saturado já referido. 1 Curva de retenção	Para o cálculo das tensões efectivas: Parâmetro α S_r , λ e P (curva de retenção)
Material destruturado	1 ensaio edométrico	$\kappa_{mf\bar{d}}$
Material compactado	4 ensaios edométricos onde o incremento de tensão é aplicado sob sucção constante diferente, sendo um deles saturado. 3 ensaios edométricos onde as amostras são sujeitas a um ciclo de molhagem secagem antes de prosseguir com o incremento de tensão.	Calibração do <i>BBM</i> : $\lambda_M(0)$, r , β , κ_M , κ_{SM} , p^C e p_0^*

No total, são necessários 15 ensaios para a calibração do modelo. Este número pode ser reduzido para 12 se se optar por considerar $\alpha = 1,0$ na definição das tensões efectivas para a microestrutura (Eq. 3), ou para 8 se se adoptar para o fragmento o modelo de comportamento do material destruturado (feito por Cardoso (2009) com resultados aceitáveis se não se aplicar mais do que um ciclo de molhagem-secagem).

Para os parâmetros de calibração numérica, actualmente já existem ferramentas numéricas que permitem a sua optimização (algoritmos genéticos, por exemplo). Os valores propostos neste estudo poderão ser um bom ponto de partida para a definição de intervalos de variação.

7 – CONCLUSÕES

Apresentaram-se os principais resultados dos ensaios laboratoriais realizados para caracterizar o comportamento hidro-mecânico das margas (fragmento) e das margas compactadas (conjunto de fragmentos) usadas na construção de alguns aterros da A10. Através de uma análise hidro-mecânica acoplada foi possível reproduzir os mecanismos de degradação observados na molhagem de fragmentos de margas, com a identificação de padrões de fendilhação semelhantes aos observados experimentalmente. Na prática ocorre degradação por fendilhação, mas também perda de forma e de rigidez, logo perda de estrutura. Assim, para modelar o comportamento do fragmento foi necessário definir um modelo com um parâmetro de dano de modo a simular a destruturação progressiva do material. Este parâmetro está associado à existência de minerais que confinam os minerais argilosos expansivos, cuja rotura leva a amolecimento. Este processo é irreversível e é responsável por alterações importantes no fragmento, e consequentemente no material compactado.

Para as margas compactadas foi desenvolvido um modelo constitutivo em que as deformações volumétricas são calculadas considerando o impacto que as deformações e degradação física dos fragmentos têm no conjunto. Este comportamento é muito complexo, e para a sua compreensão consideraram-se três níveis estruturais, correspondentes a: (i) agregado de minerais elementar da rocha marga (partículas argilosas e outros minerais), (ii) fragmento, ou a rocha, que corresponde aos agregados de minerais unidos por um parâmetro de ligação (parâmetro b) que se vai alterando com a degradação física, e (iii) conjunto dos fragmentos, que não têm ligação física entre si e que só são afectados se houver alteração significativa do nível estrutural inferior. Estes três níveis são tratados com um modelo BExM que inclui outro modelo BExM para a microestrutura, modificado para considerar a degradação dos fragmentos. Embora a rotura das ligações internas nos fragmentos de marga seja o que explica o comportamento do conjunto de fragmentos compactados, é aceitável não considerar este parâmetro de dano para o material compactado porque as mudanças estruturais observadas neste material compactado não são causadas pela quebra de qualquer tipo de ligação entre os fragmentos. Esta questão foi resolvida de forma simplificada, definindo dois conjuntos de funções de interação para as margens compactadas e o correspondente mecanismo de endurecimento / amolecimento.

O modelo desenvolvido para o fragmento foi capaz de reproduzir o comportamento observado nos ensaios, onde se observou forte degradação devido à aplicação de ciclos de carga-descarga sob diferentes sucções. O modelo desenvolvido para o material compactado conseguiu reproduzir a transição entre um material granular, semelhante a um enrocamento, e um material argiloso. Foi ainda capaz de reproduzir trajectórias de carregamento onde foram aplicados ciclos de molhagem-secagem e de descarga-recarga. A principal vantagem de se incluir o modelo dos fragmentos no modelo do material compactado é ter presente a explicação física do comportamento observado, apesar de aumentar a sua complexidade.

Como a inclusão explícita dos fragmentos ao nível da microestrutura permite reproduzir o comportamento complexo do material compactado sujeito a várias trajectórias de carregamento, pode considerar-se que o modelo como um contributo promissor para a modelação de materiais complexos tais como as margas compactadas investigadas.

8 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho sintetiza parte do trabalho de doutoramento da autora, vencedor do Prémio Manuel Rocha para a melhor tese de doutoramento em Geotecnia em Portugal entre 2008-2012. Este doutoramento foi orientado pelo Professor Emanuel Maranha das Neves, do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, e pelo Professor Eduardo E. Alonso da Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha, a quem a autora agradece todo o apoio, amizade e transmissão de conhecimentos. Para além de agradecer à SPG a atribuição do prémio Manuel Rocha, a autora agradece também à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia, FCT I.P., o financiamento concedido através do projecto PPCDT/ECM/59320/2004 e da bolsa individual de doutoramento ref. SFRH/BD/25846/2005. Finalmente, agradece também à BRISA a permissão para ter como caso-estudo os aterros da A10 construídos com este material e que motivaram esta investigação.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.E. (1998). *Modelling expansive soil behaviour*. Proc. of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils, eds. Technical Committee of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils, International Academic Publishers, Vol. 2, pp. 37-70. Beijing.
- Alonso, E.E., Gens, A. e Josa, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, 40(3), pp. 405-430
- Alonso E.E. e Gens A, (1994). *On the mechanical behaviour of arid soils*. Engineering characteristics of Arid Soils, eds. PG Fookes and RH Parry, Balkema, pp. 173-206.
- Alonso, E.E, Vaunat, J. e Gens, A (1999). *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*. Engineering Geology, 54, pp. 173-183.
- Alonso, E.E. e Alcoverro, J. (2002). *Swelling and degradation of argillaceous rocks*. Proc. of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, eds. Jucá, de Campos and Marinho, Swets and Zeitlinger, pp. 37-70.
- Alonso, E.E., Pereira, J.-M., Vaunat, J. e Olivella, S. (2010). *A microstructurally-based effective stress for unsaturated soils*. Géotechnique, 60(12), pp. 913-925.
- Burland, J.B. (1990). *On the compressibility and shear strength of natural clays*. Géotechnique, 40(3), pp. 329-378.
- Cafaro F. e Cotecchia F. (2001). *Structure degradation and changes in the mechanical behaviour of a stiff clay due to weathering*. Geotechnique, vol 51(5), pp. 441-453.
- Cardoso, R. (2009). *Hydro-mechanical behaviour of compacted marls*. PhD Thesis. Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal.
- Cardoso, R. e Alonso, E.E (2009). *Degradation of compacted marls: a microstructural investigation*. Soils and Foundations, Vol.49, No.3, pp. 315-327.
- Cardoso, R. e Alonso, E.E (2010). *On the definition of constitutive models for compacted soft rocks*. Proc. 4th Int. Conf. Unsaturated Soils, eds. Alonso, E.E. and Gens, A., Barcelona.
- Cardoso, R., Della Vecchia, G., Jommi, C. e Romero, E. (2010). *Water retention curve for evolving rocks under suction cycles*. Proc. 4th Int. Conf. Unsaturated Soils, eds. Alonso, E.E. and Gens, A., Barcelona.
- Cardoso, R. e Maranha das Neves, E. (2011). *Estudo de um aterro da autoestrada A10 construído com margas*. Revista Geotecnia da Sociedade Portuguesa de Geotecnia nº 123, pp. 3-27

- Cardoso, R. e Maranha das Neves, E. (2012). *Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment*. Engineering Geology, 133-134, pp. 76-84.
- Cardoso, R., Maranha das Neves, E. E. e Alonso, E.E. (2012). *Experimental behaviour of compacted marls*. Géotechnique, 62 (11), pp. 999 -1012.
- Cardoso, R., Alonso, E.E. e Maranha das Neves, E. E. (2013). *A constitutive model for compacted expansive and bonded marls*. Géotechnique, 63 (13), pp. 1116 -1130.
- Fukumoto, T. (1992). *Particle breakage characteristics in granular soils*. Soils and Foundations, 32(1) pp. 26-40.
- Fumagalli, E. (1969). *Tests on cohesionless materials for rockfill dams*. J. Soil Mech. Found. Engng Div., ASCE 95, No. SM1, pp. 313-330.
- Gens A. e Alonso E.E. (1992). *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*. Canadian Geotechnical Journal, 29, pp. 1013-1032.
- Gens, A. e Nova, R. (1993). *Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks*. Symp. on Geotechnical Eng. Hard Soils-Soft Rocks, vol. 1, pp. 485-494.
- Gullà, G., Mandaglio, M.C., e Moraci, N. (2006). *Effect of weathering on the compressibility and shear strength of a natural clay*. Canadian Geotechnical Journal, 43, pp. 618-625.
- Leroueil, S. e Vaughan, P. (1990). *The general and congruent effects of the structure in natural soils and weak rocks*. Géotechnique, vol 40(3), pp. 467-488.
- Maranha das Neves, E. (2016). *Mecânica dos estados críticos. Solos saturados e não saturados*. IST Press, Lisboa.
- Marsal, R. J. (1967). *Large scale testing of rockfill materials*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 93(2), pp. 27-43.
- Marsal, R. J. (1973). *Mechanical properties of rockfill*. In Embankment dam engineering. Casagrande volume (eds R. C. Hirschfeld & S. J. Poulos), John Wiley & Sons, New York, pp. 109-200.
- Nobari, E. S. e Duncan, J. M. (1972). *Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams*. Department of Civil Engineering, Report No. TE-72-1. University of California.
- Nuth, M. e Laloui, L. (2007). *Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 31, pp. 771-801.
- Oldecop, L.A. (2000). *Compressibilidad de escolleras. Influencia de la humedad*. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
- Oldecop, L.A. e Alonso, E.E. (2001). *A model for rockfill compressibility*. Géotechnique, 51(2), pp. 127-140.
- Oldecop, L.A. e Alonso, E.E. (2007). *Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill*. Géotechnique, 57(3), pp. 289-301.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. e Alonso, E. E. (1996). *Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGHT) for coupled analysis of saline media*. Engineering computations, vol. 13(7), pp. 87-112.

UPC-DLT (2002). *CODE_BRIGHT - User's Guide*. Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 892-898.

Veiga Pinto, A.A. (1983) *Prediction of the structural behaviour of rockfill dams*. PhD thesis National Laboratory of Civil Engineering, Portugal.

LISTA DE SÍMBOLOS

α - constante para definição das tensões efectivas considerando o grau de saturação

β - constante para definição do índice de compressibilidade elastoplástica para variações de tensão isotrópica em condições não saturadas

$\delta\epsilon_v^p$ - deformações volumétricas plásticas

κ - índice de compressibilidade elástica para variações de tensão isotrópica

κ_M - índice de compressibilidade elástica para variações de tensão isotrópica para o material compactado

$\kappa_m(b)$ - índice de compressibilidade elástica para variações de tensão isotrópica para o material durante a sua destruturação

κ_{mfd} - índice de compressibilidade elástica para variações de tensão isotrópica para o material destruturado

κ_s - índice de compressibilidade elástica para variações de sucção

κ_{sM} - índice de compressibilidade elástica para variações de sucção para o material compactado

λ - constante

$\lambda(0)$ - índice de compressibilidade elastoplástica para variações de tensão isotrópica em condições saturadas

$\lambda_M(0)$ - índice de compressibilidade elastoplástica para variações de tensão isotrópica para o material compactado saturado

$\Delta\sigma_h$ - variações da tensão horizontal

$\Delta\sigma_v$ - variações da tensão vertical

Δb - aumento de destruturação devida a sucção

a - constante

b, b_0 - parâmetro de dano

C - constante

D - diâmetro

$d\epsilon_m^e = d\epsilon_{frag}^e$ - deformações elásticas do fragmento

$d\epsilon_{frag}^p$ - deformações plásticas do fragmento

$d\epsilon_{frag}^{LC}$ - deformações plásticas do fragmento calculadas com a curva LC

$d\epsilon_M^p$ - deformações plásticas do material compactado

$d\epsilon_M^{LC}$ - deformações plásticas do material compactado calculadas com a curva LC

$d\epsilon_M^e$ - deformações elásticas do material compactado

e - índice de vazios total

e_{frag} - índice de vazios do fragmento

e_M - índice de vazios da macroestrutura

e_m - índice de vazios da microestrutura

e_{mo} - índice de vazios da microestrutura inicial

f - função de interacção genérica
 f_I - função de interacção genérica quando SI é activada
 f_D - função de interacção genérica quando SD é activada
 f_0 - constante da função de interacção
 f_1 - constante da função de interacção
 f_{Frag} - função de interacção genérica para o modelo do fragmento
 f_{Comp}, f_{nb}, f_b - função de interacção genérica para o modelo do material compactado
 h_1 - constante
 k_{int} - permeabilidade intrínseca
 k_{sat} - permeabilidade saturada
 LC - Curva de cedência (Loading Collapse)
 n - constante da função de interacção
 NL - linha neutra
 P - constante do material
 p_0^* - tensão de cedência isotrópica para o material saturado
 p_{0r}^* - tensão de cedência isotrópica para o material completamente destruído
 p_{0b}^* - tensão de cedência isotrópica para o material com a estrutura intacta
 p - tensão média de compressão
 p' - tensão média efectiva de compressão
 p'_{max} - tensão média efectiva de compressão máxima
 p_0 - tensão de cedência isotrópica para o material não saturado
 p^c - tensão de referência
 p_r^c - tensão de referência para o material completamente destruído ($b=0$)
 r - parâmetro
 s - sucção
 SD - curva de cedência activada na molhagem (Suction decrease)
 SI - curva de cedência activada na secagem (Suction increase)
 S_r - grau de saturação
 w - teor em água gravimétrico