

INFLUÊNCIA DAS AÇÕES ATMOSFÉRICAS NA FUNCIONALIDADE DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Influence of atmospheric actions in the functionality of geotechnical structures

Rafaela Cardoso*

RESUMO – A consideração das ações atmosféricas no dimensionamento de estruturas geotécnicas tais como taludes, aterros, barragens de aterro e fundações, justifica-se quando as deformações devidas a ciclos de molhagem e secagem (ciclos de sucção) ultrapassam valores que podem comprometer a funcionalidade destas estruturas. Para o cálculo das deformações devidas às ações atmosféricas é necessário, primeiro, quantificar essas ações no solo, tarefa onde se tem que considerar as ações atmosféricas e as características hidráulicas do solo para o seu grau de saturação e, segundo, recorrer a modelos constitutivos para solos parcialmente saturados pois a sucção tem que ser incluída como variável de estado. Como exemplo descrevem-se alguns casos estudados no IST, depois de se apresentar alguns casos que justificam a consideração das ações atmosféricas na sua análise.

SYNOPSIS – The consideration of atmospheric actions in the design of geotechnical structures such as slopes, embankments, earth dams and foundations, is justified when the deformations caused by wetting and drying cycles (suction cycles) exceed values which can compromise the functionality of these structures. The computation of the deformations due to atmospheric actions requires, firstly, knowledge of how to consider the atmospheric actions, as well as the hydraulic characteristics of the soil which account for its unsaturated state and, secondly, the use of constitutive models for partially saturated soils because suction must be included as state variable. Some cases studied at IST are presented as example, after introducing some cases which justify the consideration of climate actions in their analysis.

PALAVRAS CHAVE – Clima, solos não saturados, serviço, deformações.

1 – INTRODUÇÃO

No dimensionamento de estruturas geotécnicas em que se admite o estado limite de rotura, considera-se que os solos se encontram saturados porque é nestas condições que se verifica a menor resistência e rigidez. Tal explica-se pela ausência de forças de capilaridade já que a sucção instalada é nula. Numa análise em serviço, no entanto, deve-se considerar o estado parcialmente saturado dos solos e a sua exposição a ciclos de molhagem-secagem devido às ações atmosféricas porque é realista e porque, destes ciclos de sucção nos solos, resultam deformações sazonais que podem comprometer a funcionalidade de algumas estruturas mais sensíveis.

São muitos os casos em que se considera o comportamento em serviço no dimensionamento de estruturas geotécnicas. Um exemplo de estruturas que têm que ser protegidas da exposição às ações atmosféricas são os taludes de escavação em rochas brandas, tais como margas e rochas argilosas. Os taludes escavados nas margas da autoestrada A10 (Arruda dos Vinhos/Carregado,

* Professora Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, ULisboa. ICIST – Instituto da Construção, Estruturas e Território. E-mail: rafaela@civil.ist.utl.pt.

Formação da Abadia), cuja fotografia se mostra na Figura 1, são um exemplo. Estes taludes foram protegidos com telas de proteção após a construção, visíveis na fotografia da Figura 1 nos troços a cotas superiores para evitar a degradação das características mecânicas das margas e consequentes deslizamentos. Na fotografia ainda se veem os troços recém escavados nas cotas inferiores, ainda não protegidos.

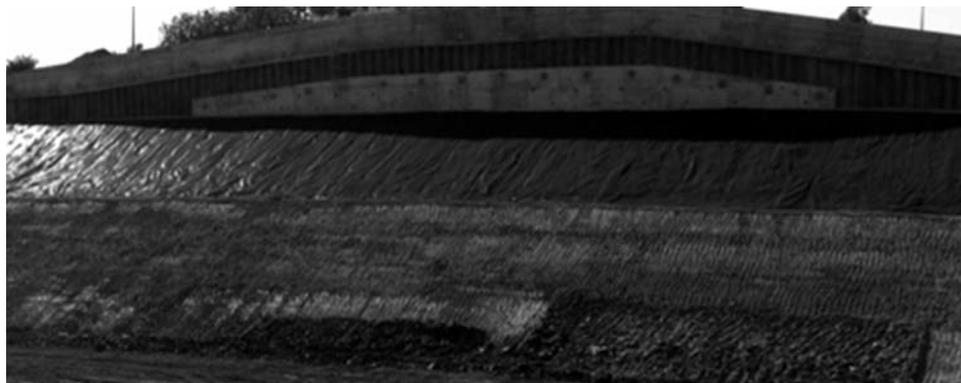


Fig. 1 – Taludes de escavação em margas (Autoestrada A10), protegidos com telas para evitar a degradação destes materiais quando expostos às ações atmosféricas.

Os solos compactados são solos parcialmente saturados, cujas características mecânicas e hidráulicas se garantem se se assegurar que todas as camadas são compactadas consoante o prescrito no caderno de encargos. A Figura 2 mostra um aterro a ser compactado. A sucção instalada depende da energia e teor em água da compactação, logo do ponto da curva de compactação adotada para cada tipo de solo. No caso dos aterros rodoviários e ferroviários, pretende-se que a sucção se mantenha constante em serviço para que as características mecânicas e hidráulicas do aterro se mantenham. Tal justifica a inclusão de sistemas de drenagem eficientes, que evitam a infiltração das águas pluviais e a ascensão da água dos níveis freáticos, e ainda a proteção dos taludes.

As barragens de aterro e de solo-enrocamento (barragem de Lechago, Espanha, na Figura 3a e barragem de Beliche, Portugal, na Figura 3b) são também construídas com materiais compactados. Neste caso é inevitável a molhagem e saturação dos materiais a montante, mas os materiais a justante também sofrem molhagem parcial porque estão sujeitos a ações atmosféricas. A compactação dos materiais argilosos do núcleo é prescrita no lado húmido para se conseguir plasticidade, diminuir a permeabilidade e evitar a fendilhação, e também para reduzir a amplitude das variações volumétricas na molhagem devido ao enchimento da albufeira. De facto, a sucção instalada é menor do que se a compactação tivesse sido feita do lado seco, e portanto a redução da sucção na molhagem (a sucção é nula quando o solo está saturado) é menor. Uma menor variação de sucção implica que as deformações do solo daí resultantes, assim como a perda de rigidez e de resistência, também sejam menores.

Já foi referido que as ações atmosféricas têm importância nas barragens pois afetam os maciços de jusante. Estes efeitos não são desprezáveis quando os maciços são de enrocamento. De facto, existem numerosas barragens instrumentadas com registo dos deslocamentos verticais ao longo de vários anos, e onde se verifica que esses deslocamentos aumentam nas alturas de maior precipitação. Pode observar-se na Figura 4 os perfis instrumentados na Barragem do Beliche (Naylor *et al.*, 1997), assim como as leituras efetuadas em cada um dos perfis, e o cruzamento dessa informação com a informação relativa ao clima e na fase de enchimento da barragem. Como esperado, os assentamentos aumentam com o aumento do nível de água no reservatório durante o enchimento, mas há acréscimos de deslocamentos quando se verificam picos de maior precipitação.



Fig. 2 – Compactação de um aterro.



Fig. 3 – Barragens de aterro: a) barragem de Lechago, em Espanha (cortesia do Professor E. E. Alonso); b) Barragem de Beliche, em Portugal (barragem de solo-enrocamento).

A correlação entre os deslocamentos verticais e o clima também está reportada em bibliografia em inúmeros casos de fundações em solos expansivos, nomeadamente no Brasil, EUA, África do Sul, Austrália, etc. A Figura 5 ilustra um caso reportado em Maryland, na Austrália (Fytius *et al.*, 2004), onde os deslocamentos foram medidos a várias profundidades. Para permitir a sua correlação com o clima, os dados relativos à precipitação e à temperatura registados na altura das medições encontram-se na mesma figura. Na análise desta figura vê-se que há empolamentos quando há molhagem e assentamentos na secagem. Vê-se também que a amplitude dos deslocamentos aumenta nas camadas superficiais, pois são as mais expostas às ações atmosféricas e são também aquelas onde a tensão vertical é mais baixa e, portanto, onde os deslocamentos estão menos restringidos.

Finalmente, para o cálculo das deformações devidas às ações atmosféricas é necessário recorrer a modelos constitutivos para solos parcialmente saturados, pois a sucção tem que ser incluída como variável de estado. O comportamento dos diversos tipos de solos perante estes ciclos é diferente conforme se abordará posteriormente, o que vai requerer diferentes modelos constitutivos. Nestes modelos tem ainda que se considerar as ações atmosféricas e as características hidráulicas do solo, nomeadamente a curva de retenção e a forma como a condutividade hidráulica depende do grau de saturação. Assim, neste artigo descreve-se a forma de obter os dados necessários para considerar o clima e para a calibração de modelos adequados para os solos e conclui-se apresentando alguns casos estudados no IST.

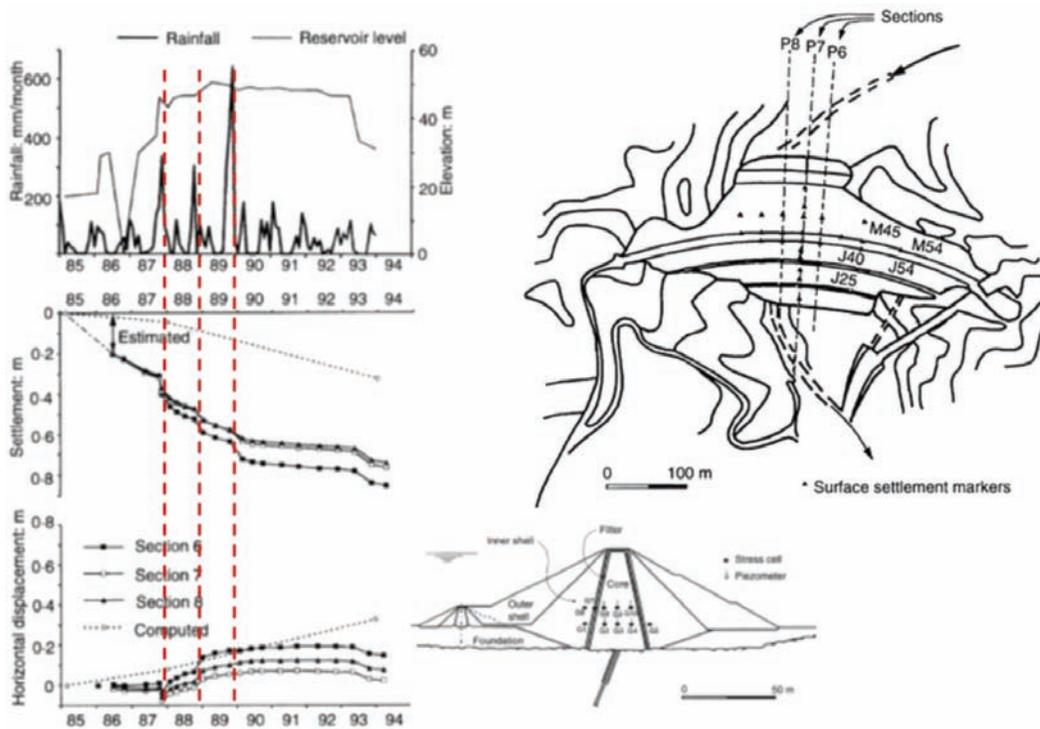


Fig. 4 – Monitorização dos deslocamentos verticais na barragem de Beliche e sua relação com as ações atmosféricas e a molhagem no enchimento (Naylor *et al.*, 1997).

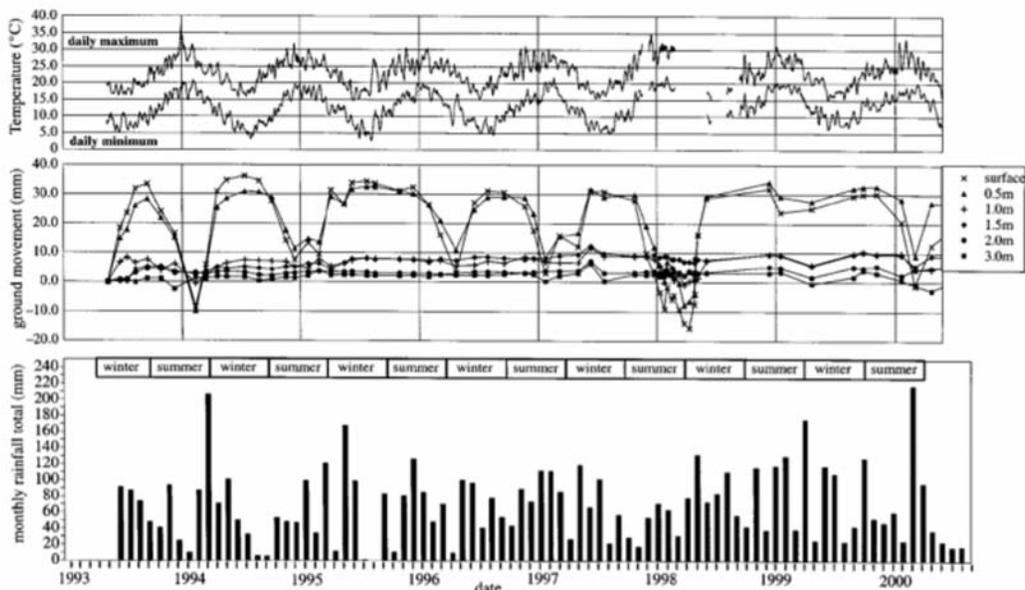


Fig. 5 – Monitorização dos deslocamentos verticais num solo de fundação e sua relação com as ações atmosféricas (Fytius *et al.*, 2004).

2 – CONSIDERAÇÃO DO CLIMA

A precipitação, a humidade relativa, a temperatura, a radiação solar e o vento e a sua velocidade são os dados meteorológicos relevantes quando se pretende considerar as ações atmosféricas. Do ponto de vista geotécnico, os mais importantes são a precipitação, a humidade relativa e a temperatura, pois são os mais fáceis de quantificar e deles dependem as trocas de água entre o solo e a atmosfera. Estas trocas resultam de um balanço entre a entrada de água (por infiltração), e a saída de água (por evaporação), que se denomina por balanço hidrológico.

Nem toda a água proveniente da precipitação se infiltra porque parte é interceptada pela vegetação e outra parte escorre superficialmente. Na ausência de precipitação, a água que se evapora ou que condensa depende da temperatura e humidade relativa do ar, assim como da presença de vegetação e de aquíferos próximos. É, portanto, difícil de quantificar a variação de teor em água no solo conhecendo só os dados relativos à precipitação, humidade relativa da atmosfera e temperatura. De uma forma simplificada, é usual considerar apenas a precipitação mas, na análise, considera-se apenas uma dada percentagem que se estima consoante a presença de vegetação (reduz-se mais ou menos consoante o tamanho e tipo de folhagem) e a inclinação da superfície (diminui para taludes mais inclinados porque neste caso a escorrência superficial é maior). Estes dados não estão quantificados, mas é usual considerar entre 25% a 85% da precipitação em superfícies horizontais, diminuindo para valores entre 15% a 70% caso a superfície seja inclinada. Podem ser encontrados valores na bibliografia da especialidade (Coppin e Richards, 1990).

Mesmo quantificando corretamente a quantidade de água infiltrada, há ainda que considerar a forma como a água fica retida no solo e como a sua quantidade varia sazonalmente. Este aspeto é importante porque, como referido antes, variações do teor em água, ou de sucção, podem levar a deslocamentos verticais. Estes são tão mais importantes quanto maior for esta variação e menor for a tensão vertical instalada.

A relação entre o teor em água e a sucção para cada solo é dada pela curva de retenção. Alternativamente ao teor em água, pode-se considerar o teor em água volumétrico ou o grau de saturação. A Figura 6 mostra a curva medida para um solo argiloso compactado com dois pesos volúmicos secos diferentes (Romero e Vaunat, 2000), definida considerando o grau de saturação. Esta curva é designada muitas vezes por curva característica, mas esta designação pode levar a más interpretações porque a curva de retenção não é constante para um dado solo, é apenas constante para uma dada estrutura desse solo. Por isso mesmo é que o mesmo solo pode ter curvas diferentes, tal como o ilustrado na Figura 6. Existem várias equações para a curva de retenção (van Genuchten, 1980; Leong e Rahardjo, 1997; Romero e Vaunat, 2000), definidas por vários autores com o objetivo inicial de quantificar a condutividade hidráulica para solos parcialmente saturados. Atualmente, são vários os estudos que pretendem incluir a definição desta curva em modelos constitutivos para solos parcialmente saturados (Vaunat *et al.*, 2000; Galipoli *et al.*, 2003; Romero *et al.*, 2011).

Como é de esperar, as camadas mais superficiais são as que são expostas às ações atmosféricas. É nestas camadas que se considera que a humidade relativa dos vazios está em equilíbrio com a humidade relativa da atmosfera. A relação entre a sucção total ψ e a humidade relativa RH é dada pela lei psicrométrica (Eq. 1), onde R é a constante universal dos gases (8,314 J/(mol K)), T é a temperatura absoluta (K), M_w é a massa molecular da água (18,016 kg/kmol) e ρ_w é a massa volúmica da água (998 kg/m³ a 293° K) (Fredlund e Rahardjo, 1993).

$$\psi = -\frac{RT\rho_w}{M_w} \ln(RH) \quad (1)$$

Do ponto de vista de Engenharia Civil, é mais intuitivo pensar em teor em água do solo do que em humidade relativa. São vários os estudos onde se efetuaram medições do teor em água em profundidade, tais como as ilustradas na Figura 7. Para além de se observar que o teor em água aumenta no inverno e diminui no verão, verifica-se também que estas oscilações deixam de ocorrer

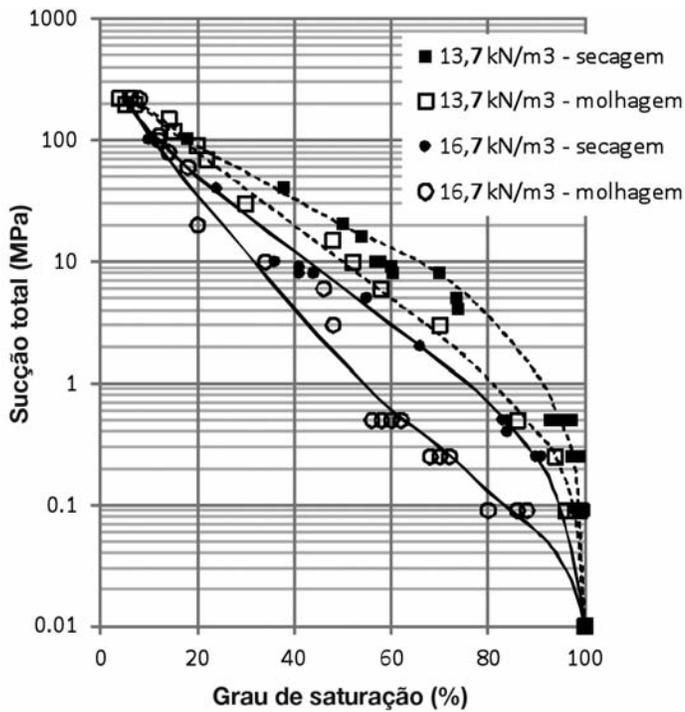


Fig. 6 – Curvas de retenção de um solo argiloso compactado com dois pesos volúmcicos diferentes (adaptado de Romero e Vaunat, 2000).

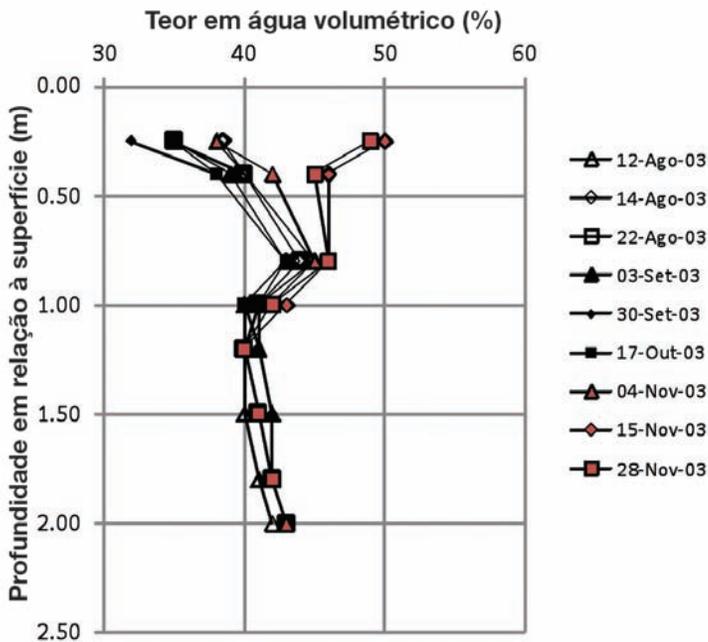


Fig. 7 – Variação do teor em água em profundidade e sua variação sazonal num solo silto argiloso (adaptado de Smethurst *et al.*, 2006).

a partir de uma dada profundidade. Esta profundidade depende do clima de cada região, vegetação ou recobrimento e tipo de solo. Pode variar entre poucos centímetros e dezenas de metros.

Estando as variações do teor em água ou de sucção associadas a deformações, como é o caso de retrações na secagem e de colapso ou empolamento na molhagem, é importante quantificá-las corretamente. Em casos de estudo com alguma importância, tal consegue-se recorrendo-se a instrumentação que permita medir essas deformações, e também a instrumentação para medir variações de teor em água que possam explicar estas deformações. Há vários instrumentos que podem ser usados para medir o teor em água no solo, ou a sua humidade relativa. São exemplo os sensores resistivos e os tensiómetros.

Os tensiómetros são os sensores mais conhecidos na agricultura. Medem a pressão da água colocada num dado recipiente fechado, que está em contacto com o solo através de uma pedra porosa saturada, geralmente cerâmica, com um alto valor de entrada de ar (poros muitíssimo pequenos). A infiltração da água nos terrenos diminui a sua pressão, até haver cavitação (quando se instala uma tensão de tração que a água já não consegue suportar).

O funcionamento dos sensores resistivos baseia-se na medição de uma dada característica que se altera na presença de água e que faz alterar a sua condutividade elétrica. Há sensores fabricados com fibras, tecido, gesso ou polímeros (Figura 8). A desvantagem deste sensores é terem pouca

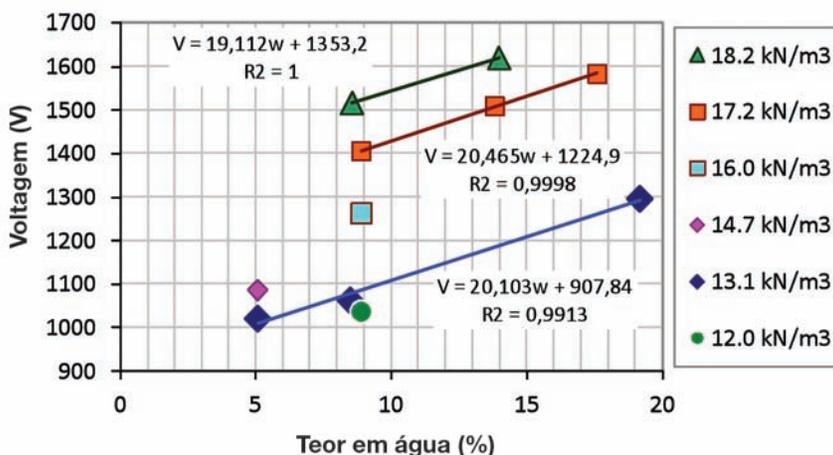


Fig. 8 – Sensores resistivos ECH2O utilizados pelo IST para medir a evolução do teor em água durante a construção de um aterro da autoestrada A10 (Cardoso *et al.*, 2010).

sensibilidade para teores em água baixos e necessitem de estar em contacto com o solo, o que os podem tornar lentos porque tem que se estabelecer equilíbrio entre o teor em água do material do sensor e o do solo. Ao ter que haver contacto também se está a limitar o seu uso a solos finos porque tem que se garantir a representatividade. De facto, quando as partículas são do tamanho do elemento de prova não se mede a humidade dos vazios do solo, mas sim a das partículas.

A Figura 8 mostra uma fotografia dos sensores resistivos ECH2O (ECH2O, 2004) usados pelo IST para medir a evolução do teor em água durante a construção de um aterro da autoestrada A10 (Maranha das Neves e Cardoso, 2006; Cardoso *et al.*, 2010). Na obra da A10, os sensores foram calibrados antes de serem instalados para se obter a relação entre a voltagem medida e o teor em água do solo em contacto com o sensor, que é função do peso volúmico do solo da cavidade à volta do sensor, onde o solo foi compactado manualmente. A curva de calibração também se apresenta na Figura 8.

Finalmente, conhecendo as variações de teor em água do solo e de sucção pode-se calcular as deformações no solo. Este cálculo requer a definição de relações constitutivas adequadas para cada tipo de solo, que se descrevem em seguida.

3 – MODELOS CONSTITUTIVOS

O estado atual de conhecimento permite considerar modelos constitutivos para enrocamentos, areias e materiais granulares e solos compactados considerando o seu grau de saturação (Alonso e Cardoso, 2010). Estes modelos são válidos para uma dada natureza e situação geotécnica, pois só assim é que é possível conseguir reproduzir as particularidades dos diversos tipos de comportamento, que estão associadas essencialmente à natureza e dimensões das partículas que os constituem. Os materiais apresentados na Figura 9 são exemplos de um enrocamento usado para construir a barragem de Lechago, areia da praia de Castelldefels, argila areno-siltosa de Barcelona

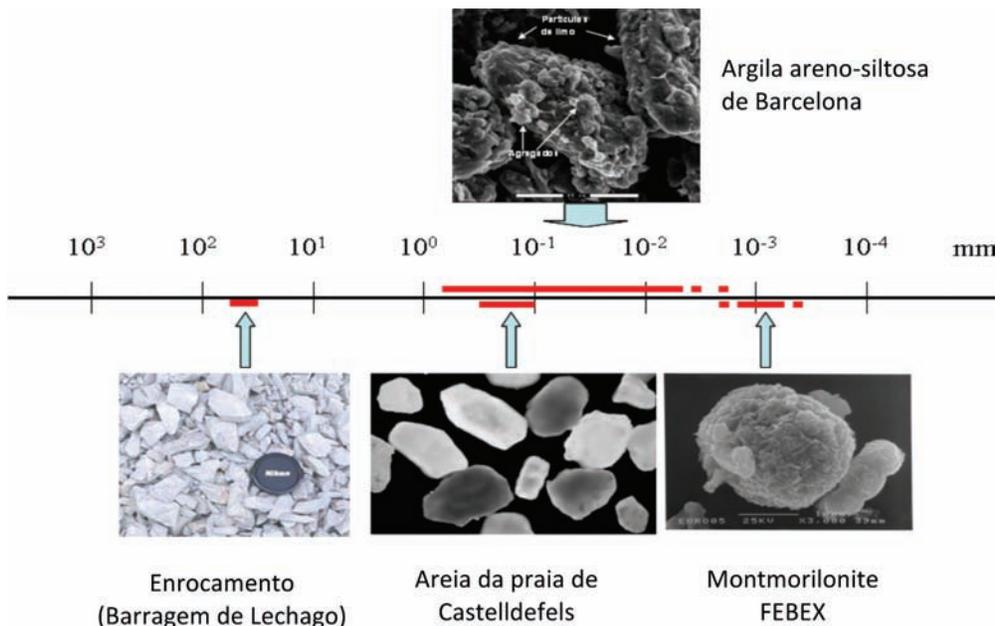


Fig. 9 – Esquema ilustrativo das diferentes dimensões dos materiais usados em obras geotécnicas (Alonso e Cardoso, 2010).

e montmorilonite FEBEX. Foram selecionados por serem representativos de cada tipo de material, que se sabe que exibem comportamentos volumétricos muito diferentes sob variações do teor em água.

No caso das areias e materiais granulares, a sucção está associada a fenômenos de capilaridade. A água existente nos poros dos materiais forma meniscos e a sucção é a resultante da tensão superficial nesses meniscos. Os modelos constitutivos para estes materiais consideram a sucção capilar como variável de estado, que entra na definição da rigidez e da resistência ao corte e à tração (sob a forma de coesão aparente).

No caso dos solos compactados com alguma percentagem de argila, considera-se a sucção total porque a água está presente não só nos vazios entre os agregados argilosos, sob a forma capilar (sucção matricial), mas também nos próprios agregados, sob a forma adsorvida (sucção osmótica). Os modelos constitutivos para solos moderadamente expansivos desprezam a contribuição da parcela osmótica nas variações volumétricas apesar de se referirem à sucção como sucção total. O Barcelona Basic Model, BBM (Alonso *et al.*, 1990), foi o primeiro modelo para solos não saturados capaz de reproduzir o colapso porque foi definido no domínio da elastoplasticidade. Recordar-se que, ao aplicar o princípio das tensões efetivas de Terzaghi, só se consegue prever empolamentos na molhagem porque, sob tensão constante, a tensão efetiva quando a sucção não é nula (pressão intersticial negativa) é maior do que quando a sucção se anula (na saturação).

O modelo BBM está definido em termos de tensões *net mean stress* p^* (Eq. 2) e sucção s (Eq. 3), onde p é a tensão média de compressão, p_l é a pressão de líquido e p_g é a pressão de gás, que se admite igual à pressão atmosférica p_{atm} .

$$p^* = p - \max\{p_g; p_l\} \quad (2)$$

$$s = p_g - p_l \quad (3)$$

O modelo, cujo espaço de tensões se apresenta na Figura 10, foi definido com base no modelo Cam Clay modificado, no qual se transforma quando a sucção se anula. Uma das maiores diferenças em relação ao modelo Cam Clay modificado é a consideração do espaço $p:s$, onde se definem duas curvas de cedência: a curva Loading Collapse (LC) e a curva Suction Increase (SI). A curva LC é dada pela Equação 4, onde p_0^* e p_0 são, respetivamente, a tensão média de cedência medida em condições saturadas e não saturadas, p^c é uma tensão de referência, κ é o índice de compressibilidade elástica para variação isotrópica de tensão que se admite independente da sucção e $\lambda(s)$ é o índice de compressibilidade elastoplástica para variação isotrópica de tensão definido em função da sucção e dado pela Equação 5, onde r e β são constantes calibradas com os resultados dos ensaios edométricos. A curva SI é dada pela Equação 6, onde $s_{m\acute{a}x}$ é a máxima sucção alguma vez aplicada ao solo.

$$\left(\frac{p_0}{p^c}\right) = \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (4)$$

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

$$s = s_{m\acute{a}x} \quad (6)$$

Em relação ao ângulo de resistência ao corte, ϕ' , admite-se que este valor é independente da sucção mas o modelo introduz a resistência à tração p_s através da Equação 7, onde K é uma constante.

$$p_s = Ks \quad (7)$$

As deformações volumétricas elásticas $d\epsilon_v^e$ obtêm-se através da Equação 8, onde o primeiro termo representa a contribuição da variação de tensão e o segundo termo representa a contribuição da variação de sucção. Nesta equação, κ_s é o índice de compressibilidade elástica para variações de sucção.

$$d\epsilon_v^e = \frac{\Delta e}{1+e_o} = -\frac{\kappa}{1+e_o} \Delta \ln(-p') - \frac{\kappa_s}{1+e_o} \Delta \ln \left[\frac{s+p_{atm}}{p_{atm}} \right] \quad (8)$$

As variações volumétricas plásticas $d\epsilon_v^p$ obtêm-se com a Equação 9, onde o primeiro termo representa o endurecimento quando há aumento de tensão e o segundo termo representa o endurecimento quando a sucção aumenta acima de s_{max} . As variáveis já foram definidas exceto λ_s , que é o índice de compressibilidade elastoplástica para variação de sucção. As deformações distorcionais plásticas, $d\epsilon_s^p$, obtêm-se destas e são dadas pela Equação 10, onde q é a tensão deviatórica, M é o declive da linha de estados críticos LEC, α é uma constante e K é a constante que traduz o aumento com a sucção da resistência à tração, ou da coesão (Equação 7).

$$d\epsilon_v^p = -\frac{\lambda(0)-\kappa}{1+e} \frac{dp_0^*}{p_0^*} - \frac{\lambda_s-\kappa_s}{1+e} \frac{ds}{s+p_{atm}} \quad (9)$$

$$d\epsilon_s^p = \frac{2q\alpha}{M^2(2p^*+ks-p_0)} d\epsilon_v^p \quad (10)$$

Finalmente, no caso dos materiais tipo enrocamento, a presença de água não tem qualquer efeito do ponto de vista de tensões efetivas porque, devido à escala, as forças gravíticas e atuantes nos contactos entre os blocos de rocha são muito superiores às forças de capilaridade. Apesar de não ser relevante considerar a sucção, tem que se considerar a presença de água porque os enroca-

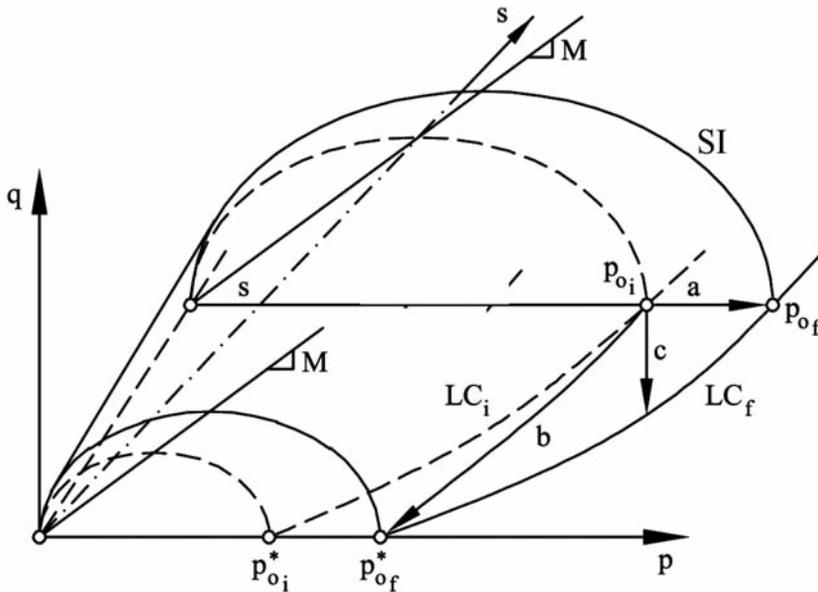


Fig. 10 – Superfícies de cedência do BBM definidas no espaço $p:q:s$ e endurecimento para diferentes trajetórias de carregamento: a – aumento de p com s constante; b – moldagem para $s = 0$ sob p constante; c – combinação das trajetórias a e b (adaptado de Alonso *et al.*, 1990).

mentos exibem deformações muito importantes quando são molhados sob tensão constante (Marsal *et al.*, 1976; Veiga Pinto, 1983; Justo e Durand, 2000). Trata-se de um mecanismo de fluência. Oldecop e Alonso (2001) explicam a fluência através de um mecanismo de rotura de blocos devido à molhagem, e rearranjo progressivo dos fragmentos daí resultantes, com novas roturas e novos rearranjos. A rotura dos blocos de rocha dá-se através de fendas que aí existam, e é iniciada quando existe água condensada nestas fendas (Figura 11), pois a água diminui a resistência à fendilhação, ou seja, diminui a tenacidade da rocha como se se tratasse de um agente corrosivo. Deste modo, a sucção está apenas associada à humidade relativa do ar das fendas, relação essa dada pela lei psicrométrica (Eq. 1).

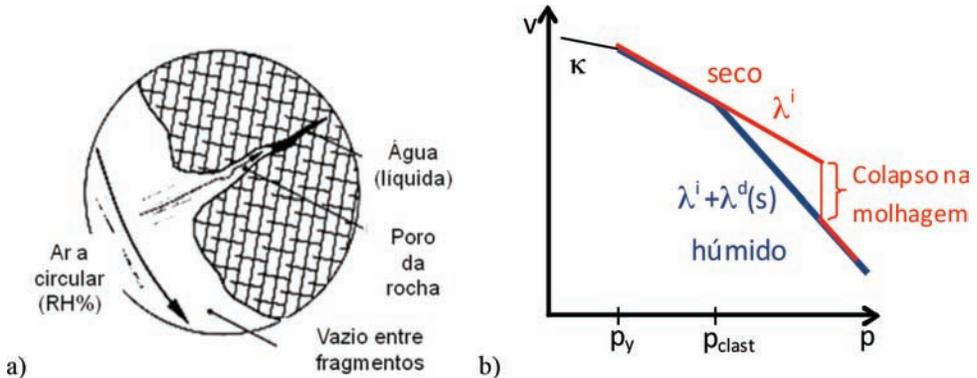


Fig. 11 – Modelo proposto por Oldecop e Alonso (2001): a) condensação da água nas fendas, o que leva à redução da resistência da rocha à fendilhação; b) plano $v:p$ do modelo, onde se representa a compressibilidade para os mecanismos MDI e MDT e o colapso.

Do ponto de vista constitutivo, Oldecop e Alonso (2001) propuseram um modelo que permite simular os assentamentos por fluência e o colapso na molhagem de enrocamentos. É também um modelo elastoplástico, que considera dois mecanismos de deformação plástica: o mecanismo de deformação instantânea MDI, que é independente da presença de água, e o mecanismo de deformação dependente do tempo MDT, que está relacionado com a fracturação dos blocos e que depende da humidade relativa. O MDI está presente para qualquer nível e incremento de tensões, enquanto que o MDT não está ativo quando o enrocamento se encontra no estado seco e apenas se torna ativo a partir da tensão de cedência clástica, p_{clast} , que define a tensão para a qual se inicia a fracturação das partículas devido à molhagem. O modelo constitutivo definido no plano $v:p$ apresenta-se na Figura 11, onde se pode ver que a tensão de cedência p_y é menor do que a tensão de cedência clástica.

A Figura 11 mostra também como se obtém as deformações volumétricas plásticas. Quando o MDI está ativo adota-se o índice de compressibilidade isotrópica para variações de tensão λ^i (Eq. 11). Quando o MDT é ativado, apenas na presença de água, a compressibilidade é acrescida de $\lambda^d(s)$ e as deformações aumentam (Eq. 12). A diminuição da compressibilidade com o aumento da sucção, ou com a diminuição da humidade relativa, é dada pela Equação 13, onde λ_0^d é o índice de compressibilidade elastoplástico para variações de tensão isotrópica em condições saturadas, α_s é um parâmetro do material e p_{atm} é a pressão atmosférica. O colapso obtém-se na molhagem, onde há transição abrupta de uma curva para a outra (Figura 11).

Apresentaram-se apenas algumas generalidades sobre os modelos mais importantes para os solos compactados pouco expansivos e os enrocamentos. Foram escolhidos apenas estes modelos porque são os definidos no programa Code Bright, que é o programa adotado para modelar alguns casos de estudo que se apresentam neste artigo.

$$d\varepsilon_{vp} = d\varepsilon^i = \lambda^i dp \quad (11)$$

$$d\varepsilon_{vp} = d\varepsilon^i + d\varepsilon^d = \left(\lambda^i + \lambda^d(s) \right) dp \quad (12)$$

$$\lambda^d(s) = \lambda_0^d - \alpha_s \ln \left(\frac{s+p_{atm}}{p_{atm}} \right) \quad (13)$$

4 – MODELAÇÃO DA AÇÃO DO CLIMA E DO COMPORTAMENTO DO SOLO

A consideração do clima como ação implica a resolução de um problema termo-hidro-mecânico acoplado pois só assim é que se consegue considerar, em simultâneo, as trocas de água entre o solo e a atmosfera sob a forma líquida e de vapor, a contribuição das características do meio poroso para essas trocas e ainda a forma como o meio poroso evolui porque pode também variar de volume. Geralmente, a resolução de problemas termo-hidro-mecânicos acoplados requer uma formulação matemática complexa e o recurso a leis constitutivas adequadas tanto para a parte hidráulica (curva de retenção e lei para a evolução da condutividade hidráulica com o grau de saturação) como para a parte mecânica (modelo de comportamento para o solo considerando o seu grau de saturação). A parte térmica diz respeito à adoção de um coeficiente de dilatação térmica e pode também estar incluída na definição de constantes a usar nas leis de comportamento hidráulico.

A calibração destas leis requer o conhecimento de várias características dos materiais. As características mais correntes são o coeficiente de permeabilidade saturado na parte hidráulica e, na parte mecânica, os parâmetros elásticos módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, e os parâmetros de calibração de modelos de comportamento elastoplásticos (modelo Cam Clay, entre outros). A dificuldade neste tipo de análise é obter os parâmetros que dependem do grau de saturação do material, pois estes são obtidos apenas através de ensaios laboratoriais. Um exemplo destes parâmetros foi dado quando se apresentou o modelo constitutivo BBM para solos não saturados. Normalmente, os ensaios realizados com o propósito de determinar as características hidro-mecânicas dos materiais considerando o seu grau de saturação são realizados apenas no âmbito de projetos de investigação pois requerem equipamentos não tradicionais.

Este tipo de cálculos tem sido efetuado no IST com o programa CODE_BRIGHT (Olivella *et al.*, 1996; UPC-DLT, 2002), desenvolvido na Universidade Politécnica da Catalunha em Barcelona, Espanha. Este programa considera o solo como um meio poroso deformável, onde as variações de volume são tratadas como variações de porosidade, ϕ . Realiza uma análise hidro-mecânica acoplada pois considera que as variações volumétricas do solo, tratado como um meio poroso deformável, são devidas a ações mecânicas (variações de tensão) e hidráulicas (variações de pressão de líquido). As características do solo, tais como a rigidez e resistência e a permeabilidade, dependem da sua porosidade.

O programa resolve de forma simultânea várias equações: (i) conservação da massa sólida, (ii) balanço da massa líquida, (iii) balanço da massa de gás, (iv) conservação da energia e (v) equilíbrio. Nas equações de conservação ou de balanço recorre-se ao conceito de derivada material D_j/Dt para ter em consideração a deformação do meio contínuo.

A Equação 14 é a equação de conservação da massa sólida obtida considerando a porosidade ϕ e a massa volúmica θ_s e j_s é o fluxo de massa sólida. Os deslocamentos u estão relacionados com a porosidade através da Equação 15. A equação do equilíbrio da massa sólida vem naturalmente igual a zero, dado que a quantidade de partículas sólidas dentro do sistema não varia ao longo do tempo.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\theta_s (1-\phi)] + \nabla \cdot (j_s) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{D_s \phi}{Dt} = \frac{1}{\theta_s} \left[(1-\phi) \frac{D_s \theta_s}{Dt} \right] + (1-\phi) \nabla \frac{du}{dt} \quad (15)$$

A Equação 16 traduz o balanço da massa de líquido, que considera a água na fase líquida com densidade θ_l^w e na fase gasosa com densidade θ_g^w (vapor de água). O fluxo de líquido é dado pelo termo f^w .

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w) + \nabla \cdot (j_l^w + j_g^w) = f^w \quad (16)$$

A Equação 17 traduz o balanço da massa de gás, que considera o ar seco com densidade θ_g^a e dissolvido na água com densidade θ_l^a .

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^a S_l \phi + \theta_g^a S_g \phi) + \nabla \cdot (j_l^a + j_g^a + i_l^a) = f^a \quad (17)$$

Nas equações 16 e 17, os fluxos de água e gás em cada fase (dados de input/output) são dados por j_x^m , onde $m=w$ para a água e $m=a$ para o ar seco, $x=l$ para a fase líquida e $x=g$ para a fase gasosa. A notação adotada para designar os fluxos f^x é idêntica. No caso do ar, a equação de balanço ainda inclui o termo i_l^a para considerar a difusão de vapor.

Considera-se que não existe ar dissolvido na fase líquida mas que pode haver água na fase gasosa. Neste caso, o vapor de água é tratado como um gás ideal. Deste modo, é importante considerar a difusão da espécie i na fase α , ω_i^α , que é a fração de massa da espécie i e na fase α obtida com a Equação 18 (lei de Fick) onde ϕ é a porosidade, ρ_α é a densidade da fase α e S_α o seu grau de saturação e D_m^i é o coeficiente de difusão (m²/s). Para o caso do vapor de água, D_m^i é dado pela Equação 19, onde T é a temperatura e D e n são parâmetros pré-definidos do modelo ($D=5,9 \times 10^{-6}$ m²s⁻¹kPa⁻ⁿ e $n=2,3$). A tortuosidade τ é considerada constante ($\tau=1$ por defeito).

$$\mathbf{i}_\alpha^i = -(\tau \phi \rho_\alpha S_\alpha D_m^i \mathbf{I}) \nabla \omega_\alpha^i \quad (18)$$

$$D_m^{vapor} = D \left(\frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right) \quad (19)$$

Para o cálculo da conservação de massa de água é necessário introduzir a curva de retenção. Adotou-se a equação proposta por van Genuchten (1980) (Eq. 20), onde S_e é o grau de saturação para um dado índice de vazios e P_0 e λ são constantes de calibração. A sucção s é a diferença entre a pressão de gás P_g e a pressão de líquido P_l ($s=P_g-P_l$) admitindo-se que a pressão de gás P_g é constante e igual à pressão atmosférica ($P_g=0,1$ MPa).

$$S_e = \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (20)$$

O fluxo de água na fase líquida é determinado através da Equação 21, na qual q_l é obtido pela lei de Darcy generalizada para o caso não saturado (Eq. 22). Nesta lei, P_l é a pressão de líquido já definida antes, ρ_l é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, μ_l é a viscosidade da água,

k_{rl} representa a percentagem da área dos vazios que está preenchida com água, k é a permeabilidade intrínseca dada pela lei de Kozeny (Eq. 23), que depende da porosidade e de um valor de referência k_0 definido para uma porosidade inicial, ϕ_0 . A permeabilidade intrínseca obtém-se a partir da permeabilidade saturada K através da Equação 24.

$$j_l^w = \rho_l q_l \quad (21)$$

$$q_l = k \frac{k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l g) \quad (22)$$

$$k = k_0 \frac{\phi^3 (1 - \phi_0)^2}{\phi_0^3 (1 - \phi)^2} \quad (23)$$

$$k_0 \approx \frac{K}{10^7} \quad (24)$$

A Equação 25 refere-se ao equilíbrio da energia e contempla a energia das várias fases E_i onde $i=s$ para a fase sólida, $i=l$ para a fase líquida e $i=g$ para a fase gasosa. O fluxo de energia por condução transferido no interior dos poros é i^c (lei de Fourier). Por último, f^Q representa o fluxo de energia que entra/sai do sistema. Os restantes parâmetros têm o significado conhecido e a notação segue a notação referida para cada fase.

$$\frac{\partial}{\partial t} [E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi] + \nabla \cdot (i_c + j_{E_l} + j_{E_g}) = f^Q \quad (25)$$

A lei de Fourier é usada para calcular o fluxo de calor i_c , tal como se apresenta na Equação 26, onde λ é o coeficiente de condutividade térmica de cada espécie e ∇T é o gradiente de temperatura.

$$\mathbf{i}_c = -\lambda \nabla T \quad (26)$$

O equilíbrio mecânico do problema é garantido pela equação do equilíbrio de forças (Eq. 27), na qual σ é o tensor das tensões e b é o vetor das forças.

$$\nabla \sigma + b = 0 \quad (27)$$

Dado tratar-se de uma análise que considera o grau de saturação dos solos, o princípio das tensões efetivas já não é válido e por isso a definição do estado de tensão é feita adotando as variáveis tensão média de compressão p^* e sucção s dadas anteriormente pelas Eqs. 2 e 4. A tensão média de compressão cobre todas as situações em que o solo se pode encontrar: se num estado saturado $P_l > 0$ logo p^* é a tensão média efetiva; se num estado não saturado, $P_l < 0$ e a tensão média p^* é uma tensão que não é nem a tensão total nem a tensão efetiva, designando-se em inglês por *net mean stress*, sem tradução evidente para o português apesar de haver algumas sugestões na bibliografia brasileira.

Finalmente, em problemas envolvendo solos não saturados, as leis constitutivas adotadas para o cálculo das deformações, tanto volumétricas como distorcionais, que se encontram implementadas em programas de cálculo incluem as parcelas devidas a variações na tensão média de compressão Δp^* e de tensão deviatória Δq , variações de sucção Δs , e, eventualmente deformações associadas a variações de temperatura, ΔT , associadas a dilatação ou a contração térmica do meio poroso. Estas últimas são elásticas, mas as restantes podem ter uma parcela plástica, dependendo do modelo constitutivo adotado para o meio poroso.

5 – ALGUNS EXEMPLOS

5.1 – Caso I - Talude de Coimbra (Autoestrada A1)

O caso que se apresenta foi estudado em colaboração com o LNEC, no âmbito de uma tese de mestrado (Verde, 2009). Trata-se de um talude em Coimbra (Figura 12), adjacente à Autoestrada A1. Das sondagens realizadas constata-se que os solos que o constituem são típicos da região de Coimbra, variando essencialmente entre argilas e siltes com presença de areias. As areias formam estratos coluviais que atingem profundidades de 20 a 25 m (Barradas, 2008a). Existe um registo de medições de deslocamentos horizontais e da profundidade do nível freático desde 1981, realizadas em tubos inclinométricos aí instalados para acompanhar o comportamento do talude após a escavação efetuada durante a construção da autoestrada.



Fig. 12 – Talude em Coimbra instrumentado pelo LNEC.

A fotografia aérea da Figura 12 mostra que a ocupação superficial consiste em floresta na zona mais alta e com forte inclinação, a que se segue uma zona intermédia quase plana onde se encontram pequenas moradias e oficinas. A estrada nacional EN110-2 está implantada no bordo inferior da zona intermédia e a A1 na zona perto da base do talude. Depois da A1 o talude continua com uma inclinação mais fraca até uma ribeira, sendo esta zona ocupada por campos agrícolas. Na planta incluída nesta figura pode observar-se a localização dos inclinómetros e dos poços de bombagem.

O talude tem vindo a apresentar movimentos desde a construção da A1 e em 2007 foi alvo de uma intervenção para melhorar as condições de drenagem (Brisa e Geocontrolo 2007) porque se verificou que havia um incremento significativo dos deslocamentos horizontais após precipitações intensas (Barradas, 2008b). A sua evolução, medida a duas profundidades num dos 20 inclinómetros instalados, apresenta-se na Figura 13 (Barradas, 2008a). Nessa figura apenas são apresentados os deslocamentos medidos a partir de 1987 porque se considerou que só a partir desse ano é que os incrementos dos deslocamentos observados deixaram de ter uma componente devida às intervenções para construção da A1 e foram apenas devidos às ações atmosféricas.

Os maiores incrementos de deslocamentos medidos no período considerado foram analisados conjuntamente com informação relativa aos períodos de maior precipitação acumulada. A análise

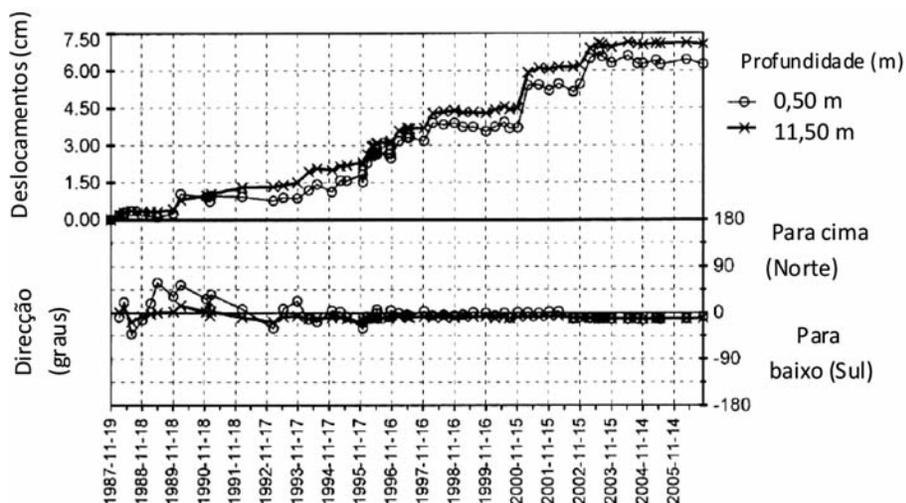


Fig. 13 – Evolução dos deslocamentos medidos no inclinómetro 20A de 1987 a 2005 (Barradas, 2008b).

efetuada apresenta-se na Figura 14 (Barradas, 2008a), onde se constata que o incremento de deslocamento medido é maior quando há maior quantidade de precipitação acumulada.

A relação entre fenómenos de instabilidade de taludes e a precipitação está bem documentada na bibliografia (Fukuoka, 1980; Finlay *et al.*, 1997; Corominas, 2000, entre outros). Em relação aos taludes na região de Coimbra, Quinta Ferreira *et al.* (2006) apresentaram um estudo onde compararam a precipitação média mensal e o número de deslizamentos ocorridos nesta região entre 1964 e 2003. Também estes autores verificaram uma relação entre a precipitação mensal e o número de deslizamentos.

Modelou-se o talude com o programa Code Bright. A geometria adotada para o modelo, características geotécnicas e parâmetros para a calibração dos modelos constitutivos adotados são descritos com mais pormenor em Verde *et al.* (2011). Para os valores dos parâmetros de calibração das várias equações apresentadas foram adotados valores que se encontram em intervalos aceitáveis para solos do mesmo tipo daqueles que foram detetados nas sondagens. Para a permeabilidade foram adotados valores próximos dos medidos *in situ*. Para o solo adotou-se o modelo constitutivo BBM.

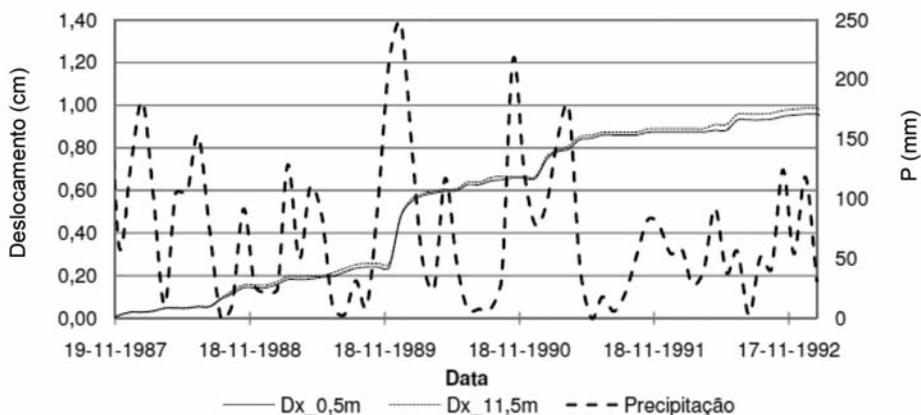


Fig. 14 – Evolução da precipitação diária P e dos deslocamentos devidos às ações climáticas no período entre 19/11/1987 e 17/11/1992 (Verde, 2009).

Considerou-se a ação de um clima médio anual da região, tendo como dados a humidade relativa, a temperatura e a precipitação média mensal. Para a definição da quantidade de água líquida (precipitação) teve-se em consideração o revestimento do talude: na área urbanizada as quantidades infiltradas foram reduzidas em 60%, enquanto nas restantes áreas essa redução foi de 25%. O período analisado vai de 1987 a 1992, antes da introdução das cortinas de poços de drenagem, pois foi o suficiente para obter a correlação entre os deslocamentos e a precipitação, que foi o objetivo deste trabalho.

A Figura 14 apresenta os valores da precipitação acumulada mensal e os deslocamentos calculados entre 1987 e 1992. A sua comparação com a Figura 13 permite verificar que foi possível reproduzir o andamento medido nos inclinómetros instalados no talude. É ainda possível detetar um acréscimo significativo dos deslocamentos no inverno de 1989. Tratou-se de uma época particularmente chuvosa como se vê pelo pico nos valores da precipitação também apresentados na figura. Porém, o inverno de 1990 foi igualmente bastante chuvoso mas não se observou um incremento tão significativo dos deslocamentos como o do ano anterior. A justificação está no facto de o solo ter um grau de saturação mais elevado no inverno de 1990 do que em 1989, resultado verificado no cálculo, o que implica menores variações de sucção logo menores variações volumétricas em 1990. A obtenção destes resultados só é possível considerando modelos que consigam simular a infiltração e retenção de água pelo solo, o que permite constatar que a calibração do coeficiente de permeabilidade e da curva de retenção do solo (modelo de comportamento hidráulico) tem tanta importância como a calibração do BBM (modelo de comportamento mecânico).

5.2 – Caso II – Barragem de Odelouca, Algarve

Este segundo caso descreve o estudo efetuado considerando o efeito da exposição às ações atmosféricas de uma barragem cuja construção foi interrompida por alguns anos após a construção da ensecadeira. Trata-se de um caso inspirado na Barragem de Odelouca, no Algarve (Figura 15). Tal como a barragem de Odelouca, a barragem estudada é uma barragem zonada com cerca de 80m de altura, onde o material dos maciços é uma mistura solo-enrocamento (Caldeira e Brito, 2007) e o núcleo é construído com argila de Silves (fotografia também na Figura 15). A Figura 16 apresenta o desenho esquemático do perfil da barragem, onde se pode observar que o corpo da barragem in-



Fig. 15 – Fotografia da Barragem de Odelouca vista de jusante e do material argiloso usado para a construção do núcleo.

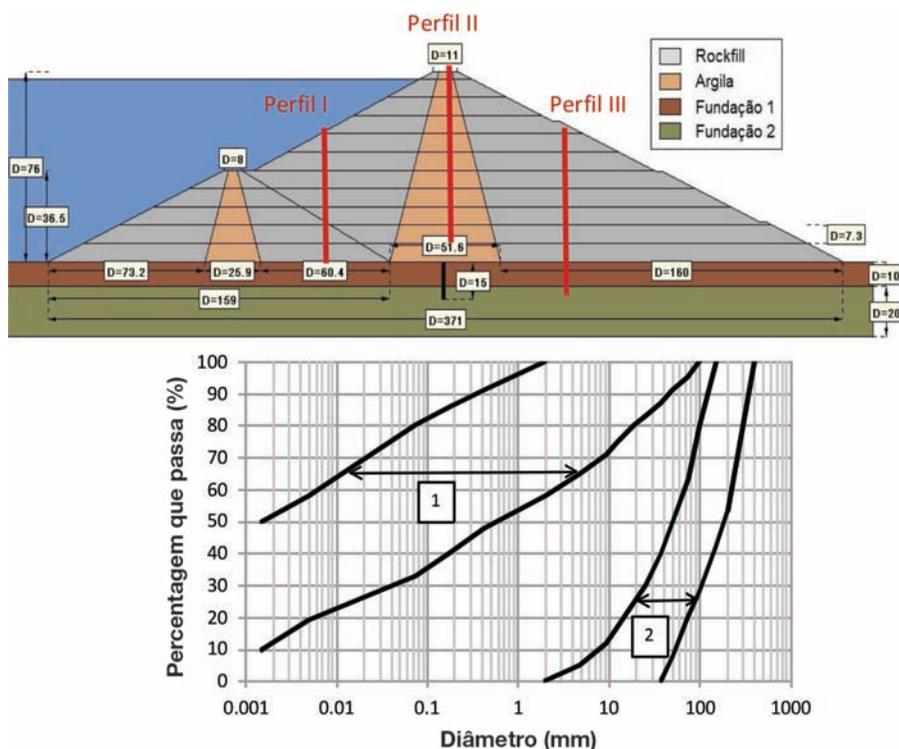


Fig. 16 – Perfil esquemático da barragem e curvas granulométricas dos materiais considerados no modelo numérico (1 – Argila; 2 – Rockfill) (Dias, 2010).

clui uma ensecadeira também construída com um perfil zonado. Nessa figura também se apresentam as curvas granulométricas consideradas para os materiais da barragem. Deste estudo resultaram as teses de mestrado de Dias (2010), para a modelação do comportamento da barragem durante a construção até ao primeiro enchimento, e de Reis (2010, 2011), para a caracterização do comportamento hidro-mecânico do material do núcleo considerando o seu grau de saturação.

Em relação aos modelos de comportamento adotados para os materiais, para a argila considerou-se o BBM e para o solo-enrocamento considerou-se um modelo para materiais tipo enrocamento, ambos descritos antes. Adotou-se um modelo para materiais tipo enrocamento para os maciços construídos com uma mistura solo-enrocamento por se admitir que o fenómeno de fluência continua a ser importante para este material, e portanto este é o modelo mais indicado.

O desfaseamento temporal entre a construção da ensecadeira e a barragem foi de pouco mais de 3 anos. Durante este período, a ensecadeira esteve exposta às ações atmosféricas, de onde pode ter resultado alteração das características hidráulicas e mecânicas dos materiais, e em particular do enrocamento dos maciços laterais. De facto, tal como discutido antes, a molhagem dos materiais tipo enrocamento dá origem à fratura e rearranjo dos blocos, resultando num maior adensamento. Deste adensamento resulta um aumento de resistência e de rigidez, o que é favorável para aterros, mas há também diminuição da permeabilidade e tal não é desejável para os maciços laterais. Para o caso particular da barragem de Odelouca, julga-se que estas alterações não foram significativas porque os maciços foram construídos com uma mistura de solo-enrocamento, logo menos sensível a molhagem do que se se tivesse adotado um material tipo enrocamento.

Julgou-se interessante estudar se o adensamento do material da ensecadeira resultante deste período de espera teria influência significativa no comportamento da barragem. No modelo numé-

rico considerou-se que os maciços eram construídos com um enrocamento semelhante ao usado na construção da barragem de Beliche, e para o qual existem muitos dados na bibliografia (Veiga Pinto, 1983; Naylor *et al.*, 1986; Naylor *et al.*, 1997; Alonso *et al.*, 2005). Para a argila do núcleo consideraram-se dados experimentais de amostras de argila de Silves (Reis, 2011), usada na construção da barragem. As curvas de compressibilidade apresentam-se na Figura 17, medidas em ensaios edométricos de amostras de argila compactadas em condições semelhantes às adotadas em obra (peso volúmico seco $17,2 \text{ kN/m}^3$, teor em água 21% e índice de vazios 0,527), ensaiadas para duas sucções diferentes (condição saturada, com $s=0 \text{ MPa}$, e caso correspondente a uma humidade relativa de 55%, correspondente a $s=85 \text{ MPa}$ para 20°C de acordo com a Equação 1).

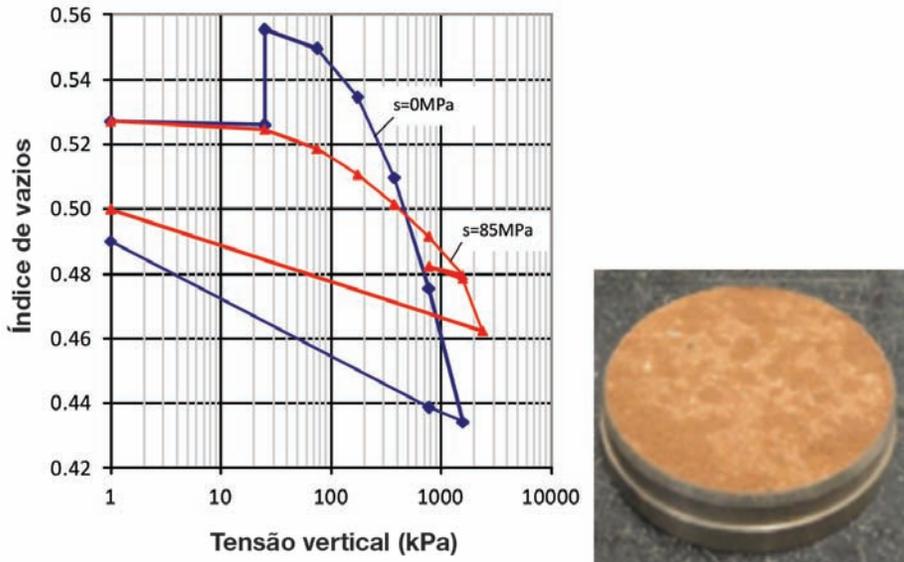


Fig. 17 – Curvas de compressibilidade da argila compactada onde são aplicadas duas sucções diferentes (adaptado de Reis, 2011).

Estes ensaios são um exemplo dos ensaios laboratoriais realizados que forneceram dados para o modelo. Tal como esperado, a rigidez e a tensão de cedência aumentam com o aumento da sucção. As sucções aplicadas em laboratório pretenderam simular situações climáticas extremas, para que se pudesse detetar claramente a influência da sucção no comportamento mecânico e calibrar as leis de comportamento que pudessem depois ser ajustadas ao caso estudado. Pode encontrar-se informação mais detalhada sobre o modelo e os principais resultados em Cardoso *et al.* (2011).

Foram dois os casos estudados considerando as ações atmosféricas: (i) Caso A – construção da barragem considerando o período de pausa de 3 anos após a construção da ensecadeira; (ii) Caso B – Construção da barragem sem considerar a pausa na construção. Estudou-se ainda o Caso 0, que corresponde à situação em que se simula a construção da barragem sem se considerar as ações atmosféricas. Utilizou-se o programa Code Bright na modelação de todos os casos. As ações atmosféricas consideradas nos casos A e B correspondem ao clima médio mensal medido na estação meteorológica do Vidigal, que é a mais próxima do local de obra, para os períodos de tempo em causa. No modelo considerou-se também um faseamento construtivo realista.

A Figura 18 apresenta a evolução da sucção para os dois casos estudados. A sucção inicial adotada no cálculo foi $0,6 \text{ MPa}$, valor realista após a compactação do solo do lado húmido e obtido com base na curva de retenção. O solo fica saturado a partir do momento em que a sucção se anula. Como seria de esperar, porque há molhagem devido à exposição às ações atmosféricas, quando há

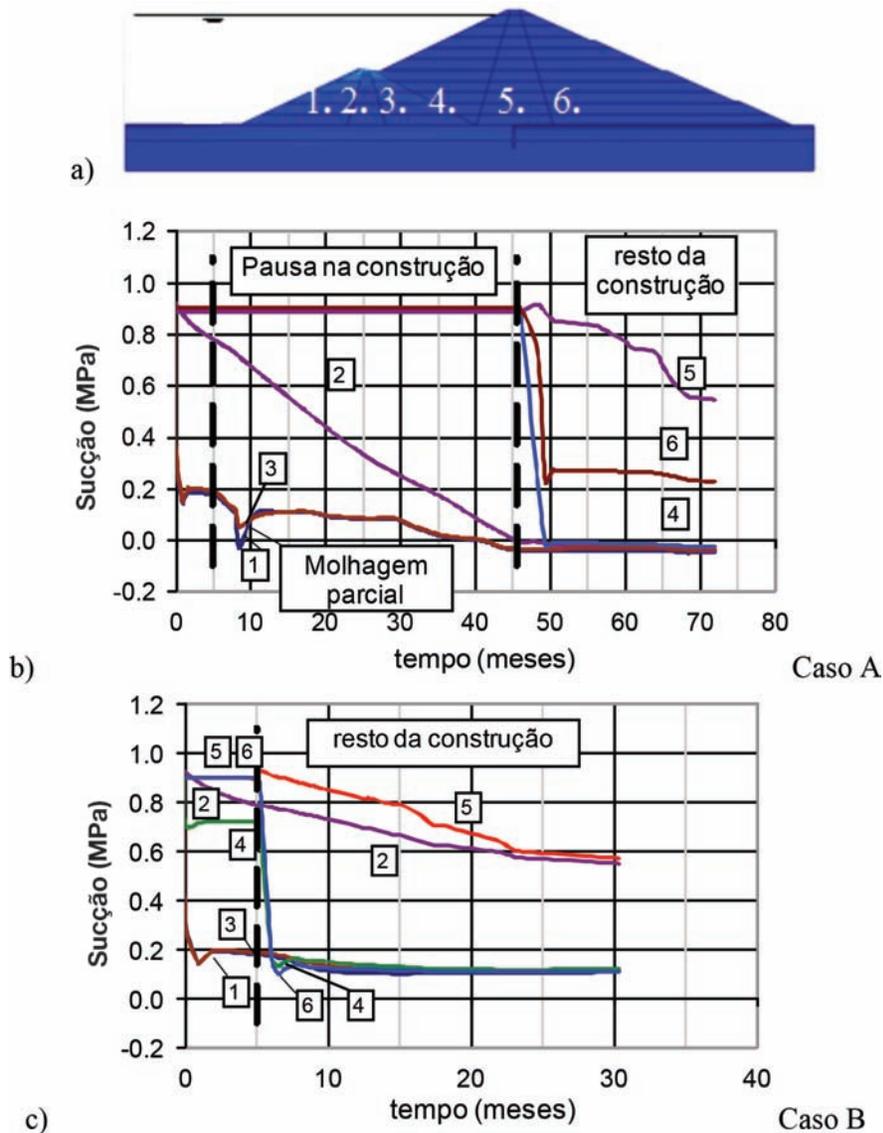


Fig. 18 – Evolução das pressões intersticiais ao longo da construção: a) pontos selecionados; b) Caso A; c) Caso B.

pausa na construção as sucções diminuem nas camadas já construídas. Esta diminuição corresponde a um aumento do teor em água e da humidade relativa nos materiais. As maiores diferenças verificam-se nos valores das sucções finais nos pontos 2, 3 e 4, que no caso A ficam praticamente saturados no final da construção, mas tal não acontece no caso B. Para o ponto 2, no núcleo da ensecadeira, a sucção vai diminuindo durante a pausa porque a água da chuva que se infiltra fica retida devido à baixa permeabilidade da argila. Nos pontos 3 e 4 (respetivamente no maciço de jusante da ensecadeira e de montante da barragem, e no maciço de montante da barragem), a água não se acumula porque os materiais são muito permeáveis, mas a sucção diminui bruscamente com a construção devido ao adensamento, que é maior no caso A porque há mais humidade no enrocamento do maciço da ensecadeira.

Considerando apenas o material tipo enrocamento, esperam-se maiores deformações devidas à rotura dos fragmentos causada pelo aumento da humidade relativa, que é tanto maior quanto maior for a tensão de confinamento. A análise de tensões (não se apresenta neste artigo, mas pode ver-se em Cardoso *et al.*, 2011) comprova que as tensões verticais instaladas nas camadas junto à fundação são superiores à tensão de cedência clástica, pelo que há condições para que o mecanismo de fluência em enrocamentos ocorra, que será tanto mais importante quanto maior for a humidade relativa do solo. Como da formação deste mecanismo resultam assentamentos importantes, analisaram-se os deslocamentos verticais ao longo de cada um dos perfis verticais identificados na Figura 16 (o perfil I inclui parte da enscadeira e o maciço de montante da barragem, o perfil II corresponde aos assentamentos do núcleo e o perfil III encontra-se no maciço de jusante da barragem). Os resultados apresentam-se na Figura 19. Nesta figura incluíram-se os assentamentos calculados para o Caso 0, apenas devido à construção, para permitir distinguir entre os assentamentos devido ao aumento de tensão durante a construção e os assentamentos devidos às ações atmosféricas (molhagem).

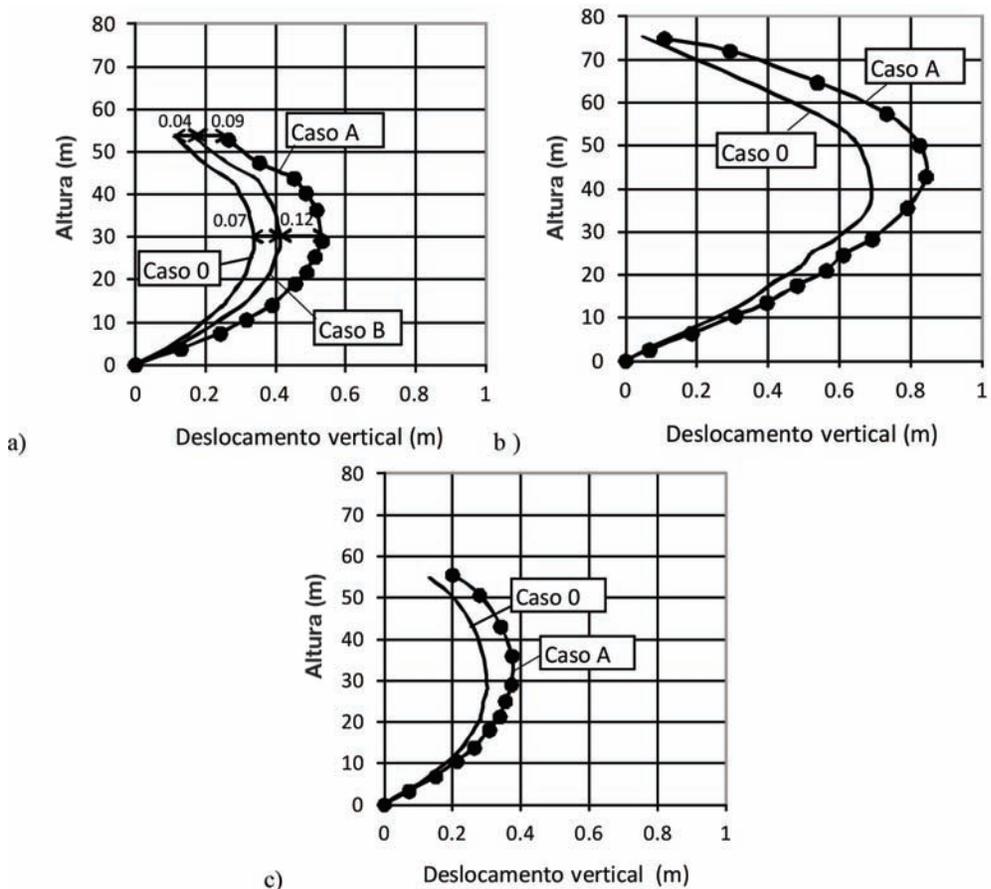


Fig. 19 – Deslocamentos verticais no final da construção para os dois casos estudados: a) perfil I; b) perfil II e c) perfil III.

Para o perfil I, como esperado, os assentamentos medidos para o caso A são superiores aos medidos para o caso B. Tal explica-se porque o tempo de exposição às ações atmosféricas (molhagem) é maior para o caso A do que para o B. A comparação destes dois casos com o caso 0 mostra

que o acréscimo devido à molhagem não é desprezável. Para os perfis II e III, localizados já na barragem, os assentamentos medidos para os casos A e B são idênticos porque o tempo de exposição às ações atmosféricas é o mesmo, apesar de o clima considerado no cálculo ser de anos diferentes. A comparação do caso A com o caso 0 mostra novamente que a molhagem devida à infiltração da água da chuva conduz a maiores assentamentos. No caso do perfil II, tal explica-se pela diminuição da rigidez do material argiloso com a diminuição da sucção (ver Figura 17). No caso do perfil III, tal explica-se pelo mecanismo de deformação dos materiais tipo enrocamento, já referido.

Para concluir, constata-se que os deslocamentos verticais da barragem estudada durante a sua construção dependem não só do acréscimo de tensões verticais devidas ao peso próprio, mas também das variações de sucção devidas à exposição às ações atmosféricas, que afetam a compressibilidade tanto dos materiais tipo enrocamento como dos materiais argilosos. Os últimos são tanto mais importantes quanto maior for o período de exposição às ações atmosféricas. Este comportamento é facilmente extrapolável para a fase de exploração e é o que explica os assentamentos por fluência observados neste tipo de estruturas geotécnicas, que se mencionou quando se apresentou o caso da barragem de Beliche (Figura 3b).

5.3 – Caso III – Aterro experimental

A quantificação dos deslocamentos é importante para estruturas mais sensíveis, ou seja, com grande exigência ao nível do seu desempenho e com grandes custos de manutenção, como é o caso de aterros ferroviários para alta velocidade (Ferreira *et al.*, 2011). Por esse motivo apresenta-se o terceiro exemplo, onde se estudou a influência das ações atmosféricas no desempenho de um aterro ferroviário. Na prática já se considera a exposição às ações atmosféricas na prescrição de sistemas de proteção e cobertura e no dimensionamento de sistemas de drenagem adequados, mas alguns estudos efetuados mostram que estes aterros são bastante sensíveis a deslocamentos sazonais (Jin *et al.*, 1994), que não são totalmente impedidos por drenagem superficial porque há a componente de infiltração através dos taludes e vias de circulação dos veículos, não impermeabilizadas.

No estudo que se apresenta em seguida simulou-se um aterro ferroviário e calcularam-se os deslocamentos sazonais devidos às trocas de água entre o solo do aterro e a atmosfera para verificar se a sua amplitude é relevante para a conceção de infraestruturas de transportes. Na primeira fase deste estudo reproduziu-se numericamente o comportamento de um aterro admitindo que era construído com um solo relativamente expansivo cujas características foram obtidas na bibliografia (Ferreira, 2007). Utilizou-se o programa Code Bright e o modelo constitutivo para solos parcialmente saturados adotado para o solo foi o BBM. Numa segunda fase, foram realizados ensaios laboratoriais numa areia siltosa compactada usada para a construção de um aterro experimental (Fernandes, 2011). Os ensaios realizados foram essencialmente ensaios edométricos (fotografia da montagem na Figura 20) e ensaios para medição da curva de retenção. Os resultados experimentais permitiram obter os parâmetros necessários para calibrar o modelo constitutivo BBM, e com eles simulou-se novamente o comportamento do aterro. Fernandes *et al.* (2012) apresentam este estudo com mais pormenor.

O comportamento volumétrico da areia siltosa foi caracterizado experimentalmente considerando o seu grau de saturação. Trata-se de uma areia siltosa com classificação SM, com cerca de 21% de finos (partículas com dimensão inferior a 0,074 mm) de natureza não plástica (NP). A fração grossa do solo usado na preparação das amostras corresponde apenas à fração passada no peneiro #4 da série ASTM. Basicamente, realizaram-se ensaios edométricos em amostras onde foram aplicadas diferentes sucções, e onde foi possível medir os índices de compressibilidade considerando a sucção instalada e obter os parâmetros de calibração da curva LC. Foi também medida a curva de retenção. Em todos os casos, a sucção foi imposta por equilíbrio de vapor. As amostras foram preparadas no ponto ótimo da curva de compactação adotando uma energia leve em molde

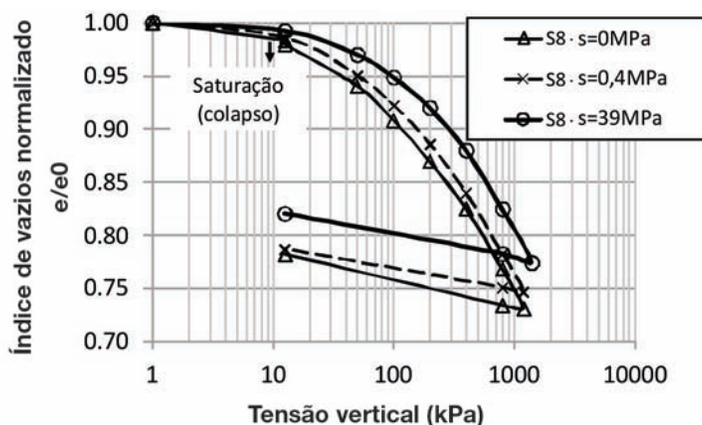


Fig. 20 – Curvas de compressibilidade medidas nos ensaios edométricos realizados em amostras com diferentes sucções aplicadas.

pequeno, (peso volúmico seco $\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$ e teor em água $w=11\%$), o que corresponde a um índice de vazios $e=0,35$.

Foram realizados ensaios edométricos em amostras deste solo submetidas a vários ciclos de secagem-molhagem (Fernandes *et al.*, 2012) de modo a quantificar se as características da areia silteosa se alteravam significativamente após a aplicação destes ciclos. Os ciclos foram aplicados com o objetivo de reproduzir em laboratório as variações no teor em água a que os solos de aterros ferroviários podem ser sujeitos ao longo do tempo, assumindo cenários particularmente desfavoráveis tais como, por exemplo, infiltração superficial em estações frias e húmidas e evaporação em estações quentes e secas. Foi também feito um estudo onde se acompanhou a evolução destes assentamentos ao longo dos ciclos e cuja fotografia do equipamento usado se mostra na Figura 21a. Trata-se de uma célula de consolidação metálica, que pôde ser colocada numa estufa à temperatura máxima de 60°C para permitir fazer uma secagem rápida de forma controlada.

A Figura 21b mostra os resultados deste teste em termos de deformação vertical (e volumétrica), ϵ_v , e do correspondente índice de vazios. Pode observar-se nesta figura que a saturação do solo conduziu a um colapso mínimo, o que era esperado porque o índice de vazios na montagem era relativamente elevado. As maiores variações verificam-se nos primeiros três ciclos, mas depois as deformações têm um carácter marcadamente elástico. De facto, a partir do terceiro ciclo, as reduções de volume associadas às etapas de secagem (retração resultante do aumento de sucção) tendem a ser recuperadas na etapa de molhagem subsequente (empolamento resultante da redução de sucção).

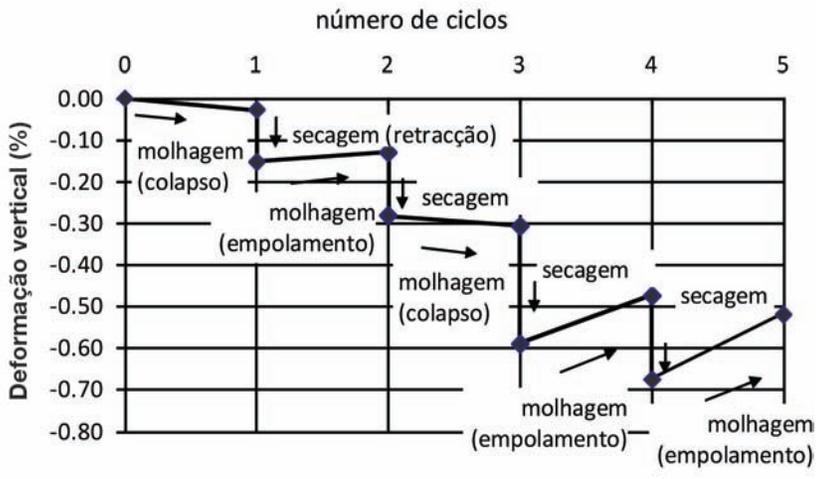
Como se trata de um solo granular, logo sem nenhum tipo de ligação que possa ser destruída ao longo dos ciclos de sucção, não se espera colapso progressivo. Os resultados deste ensaio mostram que a resposta do solo a sucessivas variações de sucção converge para um comportamento elástico e, por isso, é perfeitamente aceitável admitir este tipo de comportamento na modelação.

O modelo do aterro utilizado foi desenvolvido por Ferreira (2007) para reproduzir a estrutura de uma via balastrada moderna. A secção transversal simula um aterro ferroviário com 5 m de altura, adotando geometria e espessuras usuais em projeto para as diferentes camadas da plataforma (Teixeira *et al.*, 2010). A geometria da secção transversal apresenta-se na Figura 22a, assim como a localização dos pontos definidos para o controlo dos deslocamentos. A malha de elementos finitos gerada para o modelo apresenta-se na Figura 22b.

Considerou-se a ação de um clima mediterrânico adotando-se valores médios anuais repetidos durante um período de 5 anos (1800 dias). As variáveis atmosféricas (precipitação, humidade relativa e temperatura) foram inseridas no modelo através das condições de fronteira nas superfícies de



a)



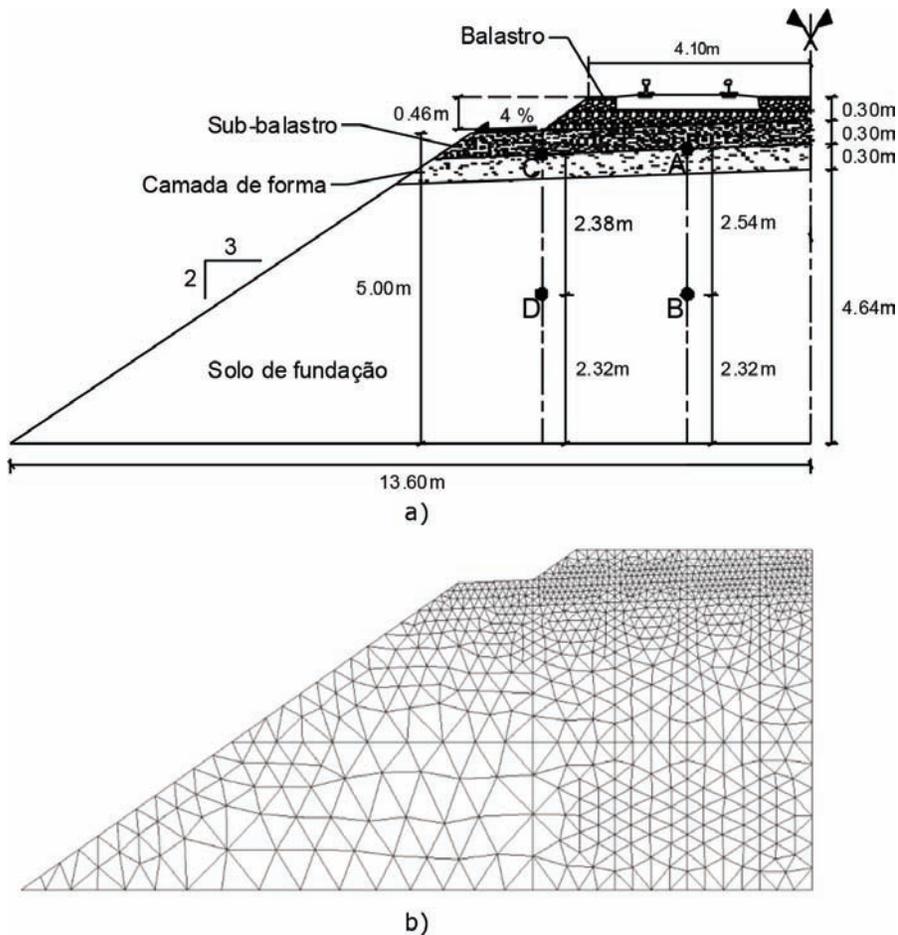
b)

Fig. 21 – Estudo experimental: (a) célula de teste; (b) evolução da deformação vertical ao longo da aplicação de oito ciclos de secagem-molhagem (Fernandes *et al.*, 2012).

interface com a atmosfera (balastro, parte superior do aterro e taludes). Foi considerado um carregamento constante de 2,4 kN/m para ter em conta a carga permanente associada aos carris e às travessas.

Realizaram-se duas simulações que diferem entre si apenas no solo adotado para o aterro e camada de forma. Um dos materiais é um solo argiloso moderadamente expansivo, o outro é uma areia siltosa compactada, cujas principais propriedades hidro-mecânicas foram definidas com base nos resultados dos ensaios experimentais (Fernandes, 2011). Os parâmetros associados à difusão de vapor e à condução de calor normalmente não variam para os diversos tipos de minerais presentes nos solos, e por isso mantiveram-se os valores obtidos na literatura.

A evolução do deslocamento vertical calculado nos pontos de controlo da plataforma (identificados na Figura 22a) ao longo dos 5 anos e para os dois tipos de solo considerados apresenta-se na Figura 23 (Figura 23a para a areia siltosa descrita e Figura 23b para a argila moderadamente expansiva). Na Figura 24, e para ambos os solos estudados, pode observar-se uma acumulação de deformação ao longo do tempo, o que corresponde a um assentamento da plataforma. Para a areia siltosa, a acumulação de deformação apenas é relevante nos primeiros 2 anos (720 dias). Para o solo argiloso, este efeito é contínuo ao longo dos 5 anos (1800 dias) de simulação. Esta diferença deve-se essencialmente às diferentes características hidráulicas dos dois solos, em particular ao seu coeficiente de permeabilidade. De facto, a estabilização dos deslocamentos apenas ocorre quando a sucção de equilíbrio entre as várias camadas de solo da plataforma é atingida. Uma vez atingido este



equilíbrio, apenas têm lugar flutuações sazonais no nível de sucção, que dão origem a deslocamentos verticais cíclicos (deformações recuperáveis) ao nível da plataforma. Esta consideração só é válida porque se adotou uma análise puramente elástica, e portanto não há acumulação de deformações devido a plastificação.

Analisando a amplitude dos deslocamentos verticais sazonais da plataforma e a sua relevância para a qualidade geométrica da via, é possível notar diferenças significativas consoante o tipo de solo de fundação. Tal explica-se pela sua diferente expansibilidade. Quando a areia siltosa é considerada como solo de fundação (Figura 23a), a amplitude dos deslocamentos sazonais é inferior a 1 mm, o que não é relevante para a grande maioria dos problemas práticos, mesmo tendo em conta as reduzidas tolerâncias geométricas que podem ser adotadas em vias de alta velocidade. Por outro lado, quando se considera a fundação em material argiloso (Figura 23b), a amplitude média dos deslocamentos ronda os 7 mm e deslocamentos com esta amplitude não são desprezáveis com base nos critérios de qualidade geométrica relativos aos defeitos longitudinais prescritos em vias de alta velocidade modernas.

Conclui-se assim que este tipo de análise é mais ou menos importante consoante o tipo de solo em causa. A areia siltosa escolhida para o estudo experimental foi selecionada com o objetivo de

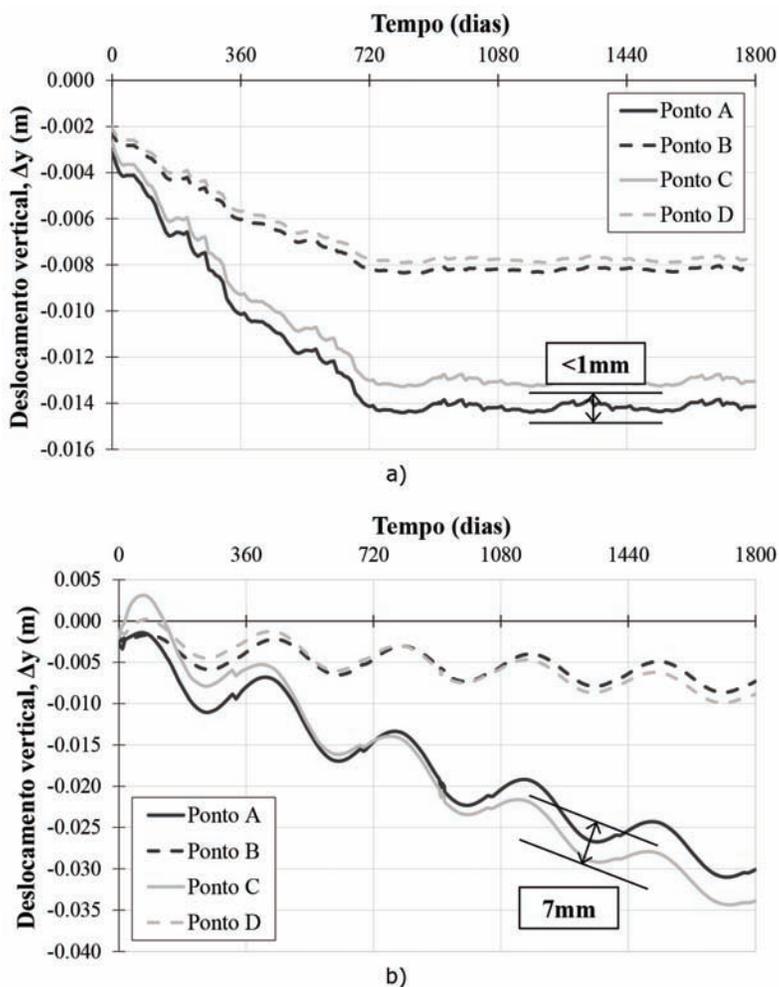


Fig. 23 – Evolução do deslocamento vertical nos pontos de controlo ao longo de 5 anos (1800 dias):
 (a) material de fundação com as características da areia siltosa compactada estudada (Fernandes, 2011);
 (b) material de fundação com características de um solo argiloso moderadamente expansivo (Ferreira, 2007).

representar solos de fundação usualmente incorporados em plataformas ferroviárias de boa qualidade. O solo argiloso é tido como um material menos adequado para a construção deste tipo de estruturas, mas ainda assim poderá corresponder a um solo natural que seja atravessado por uma linha ferroviária. Finalmente, os resultados deste estudo podem contribuir para o desenvolvimento de soluções estruturais que reduzam as necessidades de manutenção e, consequentemente, os custos de exploração em ferrovias de alta velocidade.

6 – CONCLUSÕES

As interações entre o solo e a atmosfera mais relevantes traduzem-se em situações de molhagem ou de secagem, que correspondem a variações de sucção. Dão-se essencialmente nas camadas mais superficiais pois é onde há maiores variações de sucção e menores tensões verticais, logo é nestes locais que se verificam as maiores variações de volume.

O cálculo em condições não saturadas requer programas de cálculo capazes de considerar as trocas de água entre o solo e a atmosfera e de incorporar o seu comportamento constitutivo em condições não saturadas adequado ao tipo de material. A realização de ensaios laboratoriais com aplicação/medição de sucção é necessária para obter os parâmetros necessários para a definição das leis de comportamento mecânico e hidráulico. Trata-se de ensaios não correntes, que à data têm sido realizados em âmbitos de projetos de investigação no IST e no LNEC.

A consideração do grau de saturação dos materiais (ou da sucção) na modelação do seu comportamento é fundamental quando se pretende efetuar o cálculo das deformações de estruturas geotécnicas sensíveis ao clima, como é o caso dos taludes, barragens de solo-enrocamento e aterros. O cálculo destas deformações é muito importante quando se pretende avaliar a funcionalidade destas estruturas e para estimar a necessidade de instrumentação para avaliar possíveis situações de rotura progressiva. O cálculo é também importante para estimar custos de manutenção nos aterros em geral, em particular nos mais sensíveis às deformações, como é o caso dos aterros para vias ferroviárias de alta velocidade.

Pelo descrito, justifica-se a necessidade de considerar o estado não saturado do solo e o seu comportamento perante ciclos de molhagem e secagem e foi, por isso, o tema escolhido para ser apresentado como keynote lecture no prémio dos Jovens Geotécnicos 2011 em língua inglesa.

7 – AGRADECIMENTOS

Ao Professor Emanuel Maranha das Neves, a autora agradece todo o apoio dado e o gosto transmitido pelo comportamento constitutivo de materiais não saturados, e ainda pela revisão cuidada deste texto. Agradece ainda aos Jovens Geotécnicos cujos trabalhos de mestrado no IST se inseriram neste tema, Tiago Moço Ferreira, Pedro Almeida Santos, João Verde, André Reis, João Dias e Vasco Fernandes, e ao colega Professor Paulo Fonseca Teixeira pelo interesse nas vias ferroviárias. Agradece também ao LNEC, e em particular à Investigadora Professora Laura Caldeira pelo apoio e por toda a colaboração em vários projetos em comum com o IST, e ao Investigador João Barradas pela partilha de dados. Agradece também ao Sr. José Alberto Reis, técnico do laboratório do IST, pela ajuda imprescindível na montagem dos trabalhos experimentais apresentados. Finalmente, agradece à Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, em particular ao Professor Eduardo E. Alonso, ao Professor Enrique Romero e ao Professor Sebastià Olivella, pela partilha de conhecimento no domínio dos solos não saturados e do programa Code Bright.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.; Cardoso, R. (2010). *Behaviour of materials for earth and rockfill dams: Perspective from unsaturated soil mechanics*. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, Vol. 4, pp. 1-39.
- Alonso, E.; Gens, A.; Josa, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, 40(3), pp. 405-430.
- Alonso, E.; Olivella, S.; Pinyol, N. (2005). *A review of Beliche Dam*. Géotechnique, 55(4), pp. 267–285.
- Barradas, J. (2008a). *Padrões de comportamento de taludes sujeitos a acções climáticas: dois casos de taludes de escavação*. 11º Congresso Nacional de Geotecnia.

- Barradas, J. (2008b). *Contribution to the safety evaluation of slopes using long term observation results*. In Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides. Xi'an, China. Balkema.
- Brisa e Geocontrolo (2007). Rebaixamento do Nível Aquífero e de Instrumentação no Talude da A1 ao km 189,000 S/N, Proc. 32902. Lisboa.
- Caldeira, L.; Brito, A. (2007). *Controlo da compactação de misturas de solo-enrocamento da barragem de Odelouca através de ensaios de vibração*. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, 109, pp. 43-75.
- Cardoso, R.; Caldeira, L.; Maranha das Neves, E.; Dias, J.; Reis, R (2011). *Behaviour of an earth-rockfill dam during its construction considering climate actions*. Proc. 6th International Conference on Dam Engineering, Lisbon, pp 241-255.
- Cardoso, R.; Maranha das Neves, E.; Almeida Santos, P (2010). *Suction changes during the construction of an embankment from A10 Motorway in Portugal*. Proc. International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona.
- Coppin N.J.; Richards, I.G. (1990). *Use of vegetation in civil engineering*. London: CIRIA.
- Corominas J (2000). *Landslides and climate*. Proceedings 8th International Symposium on Landslides, E. Bromhead, N. Dixon, M.L. Ibsen (Eds.). Cardiff: A.A. Balkema, 4: 1-33.
- Dias, J. (2010). *Efeitos do Clima no Comportamento de Barragens de Terra-Enrocamento*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, TULisbon.
- ECH2O (2004). Eco-sensors ECH2O - soil moisture measurement. Decagon Devices, Inc., Pullman, USA.
- Fernandes, V. (2011). *Characterization of the hydro-mechanical behaviour of railway embankment soils subjected to drying and wetting cycles*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, TULisbon.
- Fernandes, V.; Cardoso, R.; Ferreira, T.M.; Fonseca Teixeira, P. (2012). *Efeito de ciclos de molhagem e secagem no comportamento de um solo siltoso usado na construção de um aterro ferroviário*. 6º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Lisboa, Portugal.
- Ferreira, T.M. (2007). *Influence of incorporating a bituminous sub-ballast layer on the deformations of railway trackbed*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, TULisbon.
- Ferreira, T.M.; Teixeira, P.F.; Cardoso, R. (2011). *Impact of bituminous subballast on railroad track deformation considering atmospheric actions*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 137, No. 3, pp. 288-292.
- Finlay, P.J.; Fell, R.; Maguire, P.K. (1997). *The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall*. Canadian Geotechnical Journal, 34, pp. 811-824.
- Fityus, S.G.; Smith, D.W.; Allman, M.A. (2004). *Expansive soil test site near Newcastle*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 7, pp. 686-695.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons, New York.
- Fukuoka, M., (1980). *Landslides associated with rainfall*. Geotechnical Engineering, 11, pp. 1-29.

- Gallipoli, D.; Gens, A.; Sharma, R.; Vaunat, J. (2003). *An elasto-plastic model for soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour*. Géotechnique, 53(1), pp. 123-135.
- Jin, M.S.; Lee, K.W.; Kovacs, W.D. (1994). *Seasonal variation of resilient modulus of sub-grade soils*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 4, pp. 603-616.
- Justo J.L.; Durand P. (2000). *Settlement-time behaviour of granular embankments*. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 24, pp. 281-303.
- Leong, E.C.; Rahardjo, H. (1997). *A review on soil-water characteristic curve equations*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(12), pp. 1106-1117.
- Maranha das Neves, E; Cardoso, R. (2006). *Research Project for BRISA on the mechanical behaviour of embankments from A10 Motorway*. Dep. of Civil Engng., Report ICIST EP 23/06 and EP 13/08. Instituto Superior Técnico.
- Marsal R.J.; Arellano L.R.; Guzmán M.A.; Adame H. (1976). *El Infernillo: Behaviour of dams built in Mexico*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Mexico.
- Naylor D.J.; Maranhã, J.R.; Maranhã das Neves, E.; Veiga Pinto, A.A. (1997). *A back-analysis of Beliche Dam*. Géotechnique 47(2), pp. 221-233.
- Naylor D.J.; Maranhã das Neves, E.; Mattar Jr., D.; Veiga Pinto, A.A. (1986). *Prediction of construction performance of Beliche Dam*. Géotechnique 36(3), pp. 359-376.
- Oldecop, L.A.; Alonso, E.E. (2001). *A model for rockfill compressibility*. Géotechnique, 51(2), pp. 127-140.
- Olivella, S.; Gens, A.; Carrera, J.; Alonso, E.E. (1996). *Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGTH) for coupled analysis of saline media*. Engineering Computations, Vol. 13, No. 7, pp. 87-112.
- Quinta Ferreira, M.; Lemos, L.J.L.; Pereira, L.F.M. (2006). *Influência da precipitação nos deslizamentos e no comportamento dos pelitos do Triássico, em Coimbra*. 10º Congresso Nacional de Geotecnia.
- Reis, A. (2010). *Comportamento hidro-mecânico de um solo compactado com diferente teor em água e mesmo índice de vazios*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, TULisbon.
- Reis, A. (2011). *Caracterização do comportamento hidro-mecânico de um solo compactado com diferente teor em água e mesmo índice de vazios*. Prémio Jovens Geotécnicos em língua portuguesa (1º Lugar).
- Romero, E.; Vaunat, J. (2000). *Retention curves of deformable clays. Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*. Proceedings of the International Workshop on Unsaturated Soils, Trento, Italy.
- Romero, E.; Della Vecchia, G.; Jommi, C. (2011). *An insight into the water retention properties of compacted clayey soils*. Géotechnique, 61 (4), pp. 313-328.
- Smethurst, J.A.; Clarke, D.; Powrie, W. (2006). *Seasonal changes in pore water pressure in a grass-covered cut slope in London Clay*. Géotechnique, 56(8), pp. 523-537.
- Teixeira, P.F.; López Pita, A.; Ferreira, P.A. (2010). *New possibilities to reduce track costs on high-speed lines using a bituminous sub-ballast layer*. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 301-307.

- 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, Spain.
- van Genuchten, M.T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.
- Vaunat, J.; Romero, E.; Jommi, J. (2000). *An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils*. In *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils* (A. Tarantino and C. Mancuso, Eds.), Proc. Int. Workshop on Unsaturated Soils, Trento, Italy. Rotterdam: Balkema, pp. 121-138.
- Veiga Pinto, A.A. (1983). *Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento*. Tese LNEC.
- Verde, J. (2009). *Modelação do comportamento de taludes considerando acções climáticas e comparação com resultados de observação*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, TULisbon.
- Verde, J.; Cardoso, R.; Barradas, J. (2011). *Numerical behavior of a real slope considering climate actions and comparison with in situ readings*. Proc. XV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 12-15 September, Athens, Greece.