

# Análise dos efeitos da água no comportamento de taludes de aterros compactados

Pousada, M.C.

Universidad Politécnica de Madrid, España, manupousada@telefonica.net

Presa, E.P.

Universidade Federal da Bahia e Universidade Salvador, Brasil, erundino@terra.com.br

**Resumo:** Neste trabalho, discute-se essencialmente a influência das mudanças do teor de umidade do solo no comportamento característico de taludes de aterros compactados. Para isso, por um lado, descreve-se o comportamento de solos compactados a partir dos resultados de ensaios de laboratório com e sem controle da sucção e, por outro, comenta-se a utilização de um modelo adequado para previsão do comportamento tensão-deformação de aterros compactados sob ação de cargas externas (peso próprio) e internas (sucção) variáveis com o tempo.

**Abstract:** In this work, the influence of the changes of moisture content of soil in the characteristic behavior of compacted embankment slopes is discussed. Thus, on one hand, the behavior of soils compacted is described starting from the results of laboratory tests with and without control of the suction. On the other hand, the use of an appropriate model is commented on for forecast of the stress-strain behavior of embankments compacted under action of external loads (self-weight) and internal (suction) variables with the time.

## 1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos de deformação volumétrica devido à variação da umidade do solo, após sua compactação, têm importância reconhecida fundamentalmente no comportamento dos aterros compactados.

Neste trabalho apresenta-se uma análise sobre o panorama dos efeitos da variação de umidade no comportamento tensão-deformação dos solos compactados, dando ênfase aos fenômenos de colapso e expansão provocados por variações da sucção em decorrência das mudanças do teor de umidade.

## 2 TENSÕES EXTERNAS E INTERNAS

Nos solos finos, a intensidade das pequenas forças externas entre partículas, originadas pelo peso próprio do material, é comparável à das forças internas de origem matricial (adsorção e capilar), o que dá a estas últimas um papel muito relevante no comportamento deformacional referente a variações volumétricas dos maciços terrosos compactados. A medida global dessas forças internas de origem matricial, nesses aterros compactados ( $S_r < 1$ ), é dada pela intensidade da pressão de água intersticial em relação à pressão do ar dos poros (geralmente igual à atmosférica), que normalmente tem sinal negativo.

Como consequência desse estado não saturado, a água fica inicialmente submetida a uma pressão relativa negativa (inferior à atmosférica), cuja diferença com a do ar ( $u_a - u_w$ ) é denominada de sucção (Escario & Saez, 1973; Presa, 1982).

A resposta dos solos compactados ante as mudanças de umidade (umedecimento-seca-gem), que tanta influência tem no comportamento pós-construtivo dos aterros, não pode

ser entendido à margem do conceito de sucção e das teorias desenvolvidas, na atualidade, para os solos não saturados, visto que os solos compactados encontram-se num estado de umidade que corresponde a graus de saturação inferiores a um.

A existência dessas sucções conduz ao desenvolvimento de tensões internas no esqueleto sólido que induzem um efeito enrijecedor sobre o solo. Isso implica no surgimento de certo pseudo-efeito de pré-adensamento durante o período desse estado não saturado (Presa, 1997).

A presença de partículas de argila nos solos finos, em consequência da sua afinidade pela água, pode mobilizar os mecanismos de expansão e contração durante os ciclos de umedecimento e secagem.

Assim, um solo compactado pode colapsar ou expandir ao incrementar-se o seu teor de umidade, a depender de um conjunto de fatores, tais como: mineralogia, densidade seca (ou índice de vazios), teor inicial de umidade, microestrutura do solo, variação da sucção (ou do teor de umidade).

## 3 INFLUENCIA DAS VARIAÇÕES DO TEOR UMIDADE NO COMPORTAMENTO DOS ATERROS DE SOLOS COMPACTADOS

A mineralogia, estrutura e densidade seca (ou índice de vazios), após a compactação, são variáveis fundamentais que governam o comportamento induzido por variações do teor de umidade (ou sucção) nos aterros compactados (Sopeña, 2000).

As estruturas abertas, que correspondem a densidades baixas, são propensas ao colapso ao diminuir a sucção que era responsável pela rigidez do solo. É assim que, especialmente, as areias argilosas são capazes de manter

microestruturas relativamente abertas, no estado não saturado, com um comportamento muito resistente à ação de tensões externas. Entretanto, a inundação do solo ocasiona a destruição dos meniscos e dos enlacos argilosos entre grãos, podendo provocar notáveis compressões. Se a faixa de tensão aplicada é ampla, verifica-se que o colapso após a inundação cresce com a tensão aplicada até chegar a um máximo a partir do qual passam a diminuir os colapsos para tensões de confinamento superiores. Abundantes exemplos de laboratório mostram este tipo de comportamento (Matyas & Radhakrishna, 1968; Yudhbir, 1982; Delgado, 1986). É conveniente esclarecer que em alguns estudos de caso, a faixa das cargas, sucções ou densidades pode não incluir esse máximo. Porém, no caso de aterros de baixa densidade, o máximo colapso corresponde a tensões muito baixas, de tal forma que os colapsos, na prática, decrescem com a tensão aplicada.

Quando a fração argilosa contém minerais ativos que acentuam os mecanismos de expansão tem sido comprovado que a tensão aplicada ao solo inibe progressivamente a expansão segundo uma relação aproximadamente linear com o logaritmo da tensão de confinamento aplicada (Jimenez Salas & Serratos, 1953; Brackley, 1975; Presa, 1982; Justo et al., 1984).

As células edométricas com sucção controlada (Barden et al., 1969; Escario & Saez, 1973; Aitchison & Martin, 1973; Fredlund & Morgenstern, 1976; Presa, 1982; Richard et al., 1984, Delage & Silva, 1988) permitiram conhecer com mais detalhe o processo de expansão e colapso a medida que se umedece o solo. Assim, comprovou-se que os fenômenos de expansão e colapso da estrutura podem ter lugar num mesmo solo, cada um com intensidade diferente.

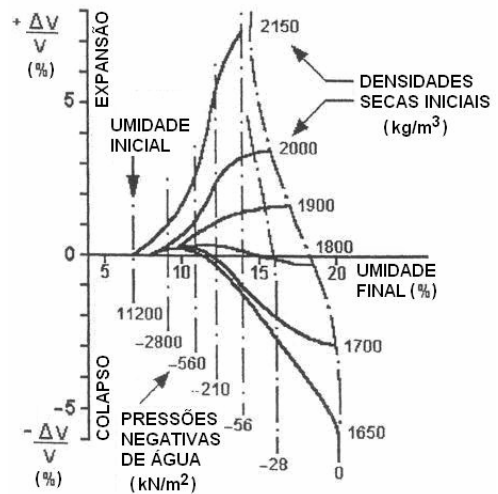


Fig.1: Deformações volumétricas, durante o processo de saturação, de um solo (marga) compactado com diferentes densidades secas.

Cox (1978) realizou uma intensa campanha de ensaios edométricos com e sem controle da sucção, cujos resultados de deformação volumétrica durante o processo de saturação são reproduzidos na Fig. 1. Nesses ensaios, o solo era saturado, após ser compactado a diferentes densidades secas, partindo sempre do mesmo teor de umidade inicial e com uma carga de confinamento constante. Como se pode observar, algumas amostras exibem o duplo comportamento expansão-colapso durante o processo de umedecimento.

Constata-se, portanto, que um solo compactado, com determinado estado inicial ( $\gamma_d$ ,  $w$ ), pode colapsar ou expandir ao ser umedecido, sendo a tensão de confinamento existente no solo antes da mudança de umidade a responsável pelo controle das deformações volumétricas. No gráfico esquemático da Fig. 2, representa-se esse tipo de comportamento. Nota-se que, geralmente, existe uma transição contínua entre os fenômenos de expansão e colapso e que a tensão que inibe a variação de

volume do solo pode ser, então, considerada uma adequada definição da pressão de expansão.

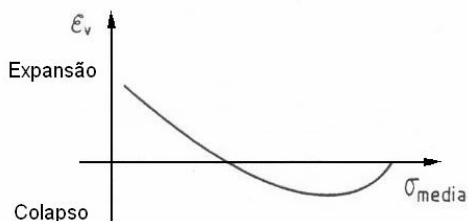


Fig. 2: Forma típica do comportamento volumétrico de um solo compactado ao ser inundado (caso geral)

Como já foi referido, para certas faixas de cargas, sucções ou densidades usadas num ensaio pode ser que determinados trechos da curva da Fig.2 não sejam visíveis. Assim, para solos sem minerais expansivos, compactados com baixa densidade seca, a curva representativa do seu comportamento volumétrico seria do tipo indicado na Fig. 3. Por sua vez, para os casos de solos areno-argilosos ou silto-arenosos, sem minerais expansivos, compactados com densidades secas relativamente altas, a curva indicativa de seu comportamento volumétrico seria do tipo indicado na Fig. 4. Finalmente, no caso de argilas expansivas ou de alta plasticidade, bem compactadas, seu comportamento volumétrico seria similar ao da curva da Fig. 5.

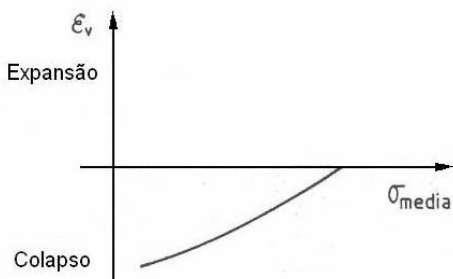


Fig.3: Forma típica do comportamento volumétrico de um solo não expansivo de baixa densidade seca.

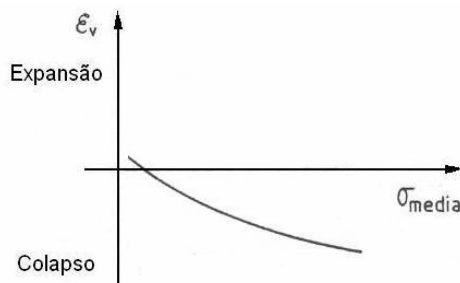


Fig. 4: Forma típica do comportamento volumétrico de um solo não expansivo bem compactado.

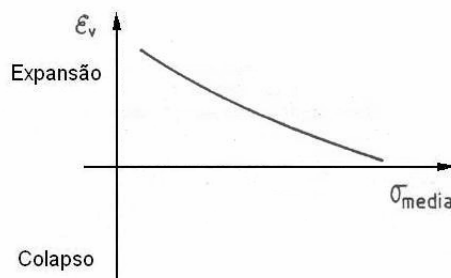


Fig.5: Forma típica do comportamento volumétrico de um solo argiloso expansivo.

Para aplicação prática destes conceitos referentes ao comportamento volumétrico, é extremamente útil relacionar as deformações induzidas pela mudança de umidade com os parâmetros de compactação que podem ser controlados durante a execução do aterro. Nesse sentido, é conveniente partir da representação clássica de compactação ( $\gamma_d, w$ ), para sobre ela situar os resultados dos ensaios de expansão/colapso para diversos níveis de tensão de confinamento. Desse modo, obtém-se uma espécie de diagrama de deformações volumétricas para dada tensão de confinamento.

Na Fig. 6, apresenta-se um diagrama deste tipo, obtido por Cox (1978), para a condição de inundação pós-compactação. Nessa figura, observa-se a dominante influência da densida-

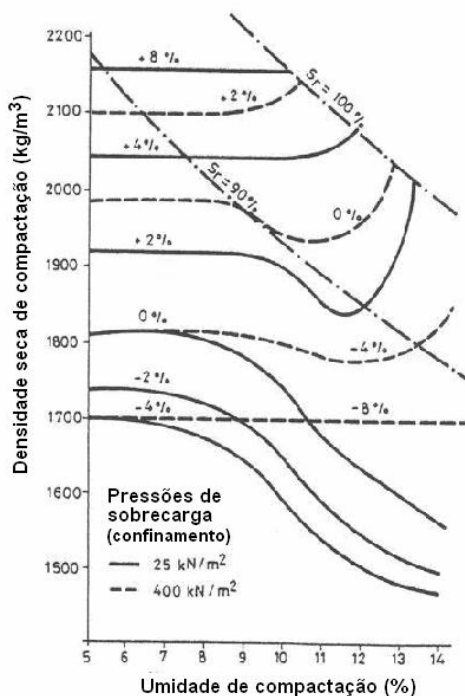


Fig. 6: Expansão ou colapso pós-inundação em função da densidade de compactação durante o processo de saturação, com sobrecarga constante.

de seca (ou índice de vazios) no comportamento volumétrico. As curvas de igual expansão ou colapso geralmente são subparalelas ao eixo das umidades, exceto nas proximidades da curva de saturação ( $S_r=1$ ), o que permite estabelecer com razoável aproximação uma relação entre a variação de volume após a inundação e a densidade seca de compactação (ou índice de vazios), para tensões de confinamento variáveis, desde que se compacte o solo em estados suficientemente afastados da saturação. Em primeira aproximação, uma relação desse tipo seria válida para teores de umidade da ordem de grandeza da ótima do Proctor ou menores que a ótima. Fica evidente também que a especificação de deter-

minada densidade seca inicial, constante para todo o aterro, não evita as variações de volume. De uma forma ideal teórica, com o fim de acompanhar a curva de deformação volumétrica nula num aterro, seria preciso compactar as camadas inferiores com mais energia e as mais próximas do contorno do aterro com menos energia. Mesmo assim, na prática, ainda seria de se esperar deformações volumétricas, pois nos aterros a variação da sucção é menos drástica do que a inundação e ademais varia ao longo do tempo de uma maneira mais ou menos cíclica, especialmente nas proximidades da superfície exposta do aterro.

Embora a maioria dos resultados publicados corresponda a condições de ensaios edométricos, parece conveniente conhecer o comportamento de solos compactados sob estados mais gerais de tensão e sucção. Em alguns casos, os ensaios confinados podem ser adequados para simular zonas do interior do aterro, mas para outras zonas, como a dos espaldares, é preciso analisar o comportamento do solo compactado frente a variações das condições de umidade quando os esforços de cisalhamento são relevantes (Alonso et al., 1990; Pousada, 2004).

Dentre os modelos existentes atualmente, para análises mais gerais de tensão e sucção, um dos mais importantes é o desenvolvido por Alonso et al. (1990). Trata-se de um modelo elasto-plástico para solos não saturados que oferece uma excelente perspectiva para a compreensão integral do comportamento de solos compactados, pois pode ter em conta os efeitos estruturais do solo compactado, admitindo que quanto mais seco esteja o solo maior deverá ser a sua sucção e o efeito enrijecedor nele. Conseqüentemente, a pressão aparente de pré-adensamento também será maior frente a cargas externas, conforme se observa na Fig. 7 (Alonso et al., 1990).

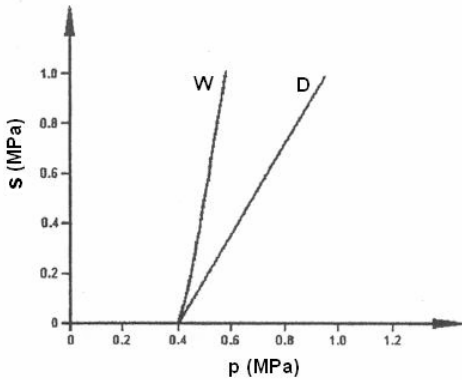


Fig. 7: Curvas de fluência de uma argila compactada em condições seca (D) e úmida (W).

As variáveis de estado que se manipulam nestes modelos (tensões e sucções, entre outras) podem ser colocadas em correspondência com os parâmetros que habitualmente se maneja na compactação (densidade, umidade, energia), permitindo a representação do solo compactado, que por sua vez será o produto obtido com determinada energia e dada umidade inicial de compactação.

A título ilustrativo, na Fig. 8 (Alonso, 1989), indica-se como o referido modelo pode reproduzir qualitativamente o processo de incremento da umidade de uma zona próxima à superfície do talude de um aterro, mostrando o aumento das deformações com a redução da sucção.

Assim, mediante estes modernos modelos elasto-plásticos para solos não saturados, que reproduzem com boa fidelidade o comportamento dos solos compactados, desde que se saiba como ligar os parâmetros de estado desses modelos com os da compactação, é possível variar as condições do mesmo para conseguir que o comportamento do produto obtido seja o desejado.

Desse modo pode-se inverter a clássica trajetória lógica seguida no planejamento de obras de aterros compactados. Para isso, em lugar de exigir propriedades intrínsecas dos materiais,

deve-se começar o processo analisando o comportamento global do aterro com base no modelo (desde o ponto de vista da estabilidade e deformabilidade, tanto a curto prazo como a longo prazo, e considerando as variações de umidade). Em seguida, deve-se avaliar a faixa de variação dos parâmetros mais diretamente ligados ao problema (sucção, deformabilidade) e, então, relacioná-los aos parâmetros de compactação (densidade, umidade) do material disponível para a obra, estabelecendo os valores exigíveis e a metodologia para obtê-los (umidade e densidade de compactação, energia e tipo de maquinaria etc.).

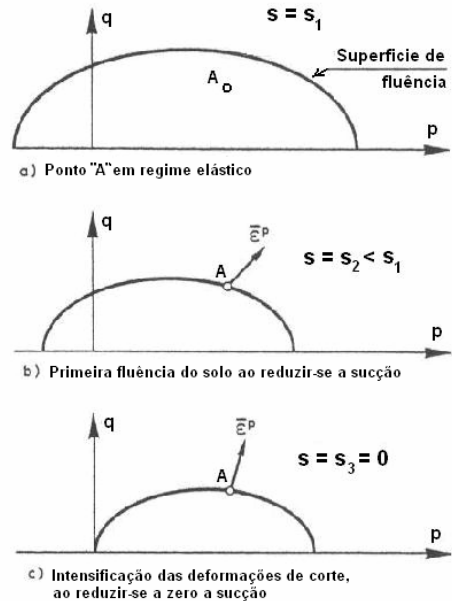
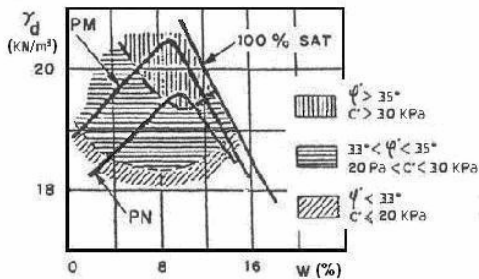


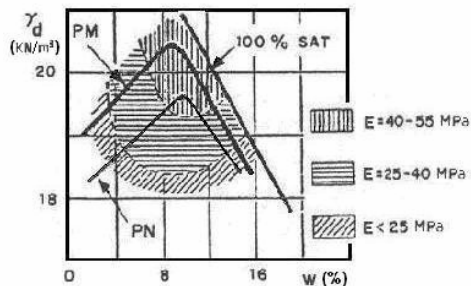
Fig. 8: Ilustração da evolução do estado das tensões num ponto próximo à superfície do talude

Dentro desta lógica moderna de conduzir o projeto e o controle de execução dos aterros compactados, em vez de exigir propriedades intrínsecas dos materiais, é necessário estudar muito bem o material compactado e, sobretudo,

as propriedades geotécnicas do produto final a ser obtido em obra, dada a variação das propriedades com o grau de compactação e o grau de saturação, como se pode apreciar na Fig. 9 em relação à variação do ângulo de atrito interno e do módulo de deformação aparente em função do grau de compactação (Proctor Normal e Modificado), em areias arcósicas de Madrid com 25-30% de finos (Espinaç & Oteo, 1983).



a) Zonas de similar ângulo de atrito



b) Zonas de similar módulo de deformação

Fig. 9: Valores dos parâmetros de resistência e deformação no diagrama de compactação.

Na Fig. 10, apresenta-se a relação entre o módulo de deformação, o potencial de colapso e o grau de compactação para um solo arenar-giloso de Madrid com 25-30% de finos (Oteo, 1994), como exemplo do passo intermediário existente entre os que representam os modelos e a compactação.

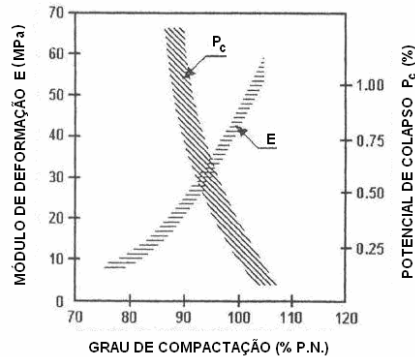
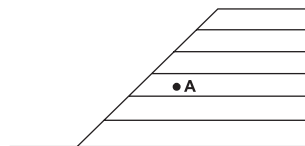
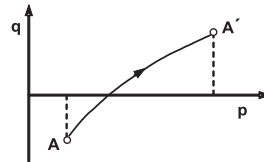


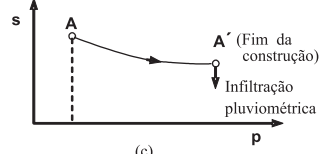
Fig. 10: Relação entre o módulo de deformação, o potencial de colapso e o grau de compactação da areia de “miga” de Madrid.



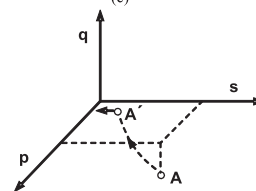
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11: Trajetórias de tensões prováveis de um ponto “A” (próximo ao talude) de um aterro ao crescer a altura do mesmo e modificar-se a sucção devido à redução dos vazios (durante a construção) e à infiltração pluviométrica após a construção.

Na Fig. 11, mostram-se as trajetórias de tensão que são impostas ao solo de um aterro compactado durante a construção e após o término da obra, que em geral são diferentes daquelas condições extremas simuladas nos ensaios edométricos tradicionais. O ponto “A” escolhido nessa exemplificação situa-se próximo ao talude de um aterro em construção (Fig. 11a) por considerar-se que é uma zona sujeita a mais modificações de umidade. O processo de compactação no ponto “A” introduz tensões horizontais de determinada grandeza no momento inicial, o que provavelmente conduz a valores iniciais negativos de “q” (Fig. 11b). Com a acumulação de camadas compactadas sobre o referido ponto, durante a construção, incrementam-se as tensões com forte componente vertical, tornando “q” positivo, e, por sua vez, a sucção inicial diminui progressivamente ao reduzir-se o índice de poros do aterro (Fig. 11c). Finalmente, após o término da construção, com a infiltração de água de origem pluviométrica, a sucção pode reduzir-se sem mudança significativa do estado de tensões totais. No espaço (p, q, s), a trajetória provável de tensões seria conforme indicado na Fig. 11d, onde  $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ ,  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  e  $s = p_a - p_w$ .

Uma questão sempre importante no projeto e construção de aterros é, portanto, conhecer o efeito que o umedecimento do solo pode ter em condições como essas aqui comentadas e que correspondem à situação das amplas zonas dos taludes de aterros quando submetidos a infiltrações pluviométricas, a fenômenos de ascensão capilar ou a infiltrações de acumulações de água procedentes de drenagens imperfeitas ou inadequadas.

#### 4 CONCLUSÕES

Com base na análise desenvolvida no presente trabalho, as principais conclusões são:

- Os solos compactados podem expandir ou colapsar em função de sua mineralogia, teor de umidade, densidade seca e tensão aplicada.
- Para um solo compactado, cujo grau de saturação não seja muito próximo de um, a densidade seca alcançada parece ser a variável que controla fundamentalmente seu comportamento frente a mudanças do teor de umidade.
- O colapso é um processo gradual controlado pela intensidade da sucção.
- Ao umedecer-se um solo, o colapso alcança um máximo para uma determinada tensão intermédia para depois passar a decrescer, podendo inclusive expandir para tensões baixas de confinamento.
- Nas argilas expansivas, a tensão aplicada ao solo inibe progressivamente a expansão segundo uma relação aproximadamente linear com o logaritmo da tensão de confinamento aplicada.
- Os modernos modelos elasto-plásticos para solos não saturados oferecem uma excelente perspectiva para a compreensão integral do comportamento dos solos compactados.

#### 5 REFERÊNCIAS

- Aitchison, G.D. & Martin, R. (1973). A membrane oedometer for complex stress-path studies in expansive clays. *Proc. 3<sup>rd</sup>. Int. Conf. Expansive Soils*, Haifa, v. 1, p. 161-167.
- Alonso, E., Gens, A. & Josa, A. (1990). A constitutive model for partly saturated soils. *Géotechnique*, v. 40-3, p. 405-430.
- Alonso, E. (1989). Efectos del agua en el comportamiento de terraplenes y terraplenes. *Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias*. Torremolinos, p. 151.



- Barden, L., Mador, A.O. & Sides, G.R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clays. *Jnl. Soil Mech. Fnd. Div.*, ASCE, 95 (SM1), p. 33-51.
- Brackley, I.J.A. (1975). A model of unsaturated clay structure and its application to swell behaviour. *Proc. 6<sup>th</sup>. Reg. Conf. for Africa on SMFE*, Durban, v. 1, p. 71-79.
- Cox, D.W. (1978). Volume change of compacted clay fills. *Clay Fills ICE*, London, p. 79-86.
- Delage, P. & Silva, S. (1988). Etude du comportement mécanique des sols non-saturés. I Compressibilité a succion controlée. *Dossier AENPC n° 356*. CERMES. Paris.
- Delgado, A. (1986). Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Escario V. & Saez, J. (1973). Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Expansive Soils*, p. 195-200.
- Espinace, R. y Oteo, C. (1983). Influencia del grado de compactación de rellenos arenosos en su deformabilidad bajo acciones estáticas y cíclicas. *Cuadernos de Investigación. Cedex*. Madrid.
- Fredlund, D.G. & Morgenstern, N.R. (1976). Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Can. Geotech. Jnl.*, 13 (3), p. 261-276.
- Jimenez Salas, J.A. & Serratos, J.M. (1953). Compressibility of clays. *Proc. 3<sup>rd</sup>. ICSMFE*, Zurich, v. 1, p. 192-198.
- Justo, J.L. et al. (1984). A finite element method to design and calculate pier foundation in expansive-collapsing soils. *Proc. 5<sup>th</sup>. Int. Conf. Expansive Soils*, Adelaide, p. 119-123.
- Matyas, E.L. & Radhakrishna, H.S. (1968). Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, v. 18 (4), p. 432-448.
- Oteo, C. (1994). Reglas generales de proyecto de terraplenes. *III Simposio Nacional de Geotecnia Vial*. Vigo, p. 183.
- Pousada, M.C. (2004). *Evaluación del comportamiento de cimentaciones superficiales apoyadas en rellenos y terraplenes*. Monografía de Suficiencia Investigadora del Doctorado (DEA), Universidad Politécnica de Madrid.
- Presa, E. P. (1982). Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid*, 663 p. (Publicado In: Cuadernos de Investigación del CEDEX, Madrid, , 1983. 274 p.).
- Presa, E.P. (1997). Deformabilidade dos solos colapsáveis não saturados. In: *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, ABMS, Rio de Janeiro, v.2.
- Richards, B.G. et al. (1984). The determination of volume change properties in expansive soils. *Proc. 5<sup>th</sup>. Int. Conf. Expansive Soils*, Adelaide, p. 179-186.
- Sopeña, L. (2000). Terraplenes. Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte. Barcelona, p. 389-415.
- Yudhbir (1982). Collapsing behaviour of residual soils. *Proc. 7<sup>th</sup>. Southeast Asian Geot. Conf.*, Hong-Kong, v. 1, p. 915-930.

