

LIQUEFACÇÃO DE AREIAS INDUZIDA POR ACÇÕES SÍSMICAS: UM FENÓMENO NÃO DRENADO OU PARCIALMENTE DRENADO?

EARTHQUAKE-INDUCED LIQUEFACTION OF SANDS: AN UNDRAINED OR PARTIALLY DRAINED PHENOMENON?

Coelho, Paulo A. Lopes F., *Schofield Centre, Cambridge University Engineering Department, UK, pal37@cam.ac.uk e Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, pac@dec.uc.pt*

Haigh, Stuart K., *Schofield Centre, Cambridge University Engineering Department, UK, skh20@cam.ac.uk*

Madabhushi, S. P. Gopal, *Schofield Centre, Cambridge University Engineering Department, UK, mspg1@cam.ac.uk*

RESUMO

A liquefacção de areias saturadas é uma preocupação séria em zonas sísmicas, sendo os projectistas geotécnicos cada vez mais impelidos a realizar o dimensionamento com base em previsões numéricas realistas do comportamento do maciço e das estruturas nele construídas. Para tal, é necessário identificar os mecanismos que controlam a liquefacção de depósitos naturais. Este artigo analisa o princípio fundamental que define a liquefacção de areias como um fenómeno não drenado, utilizando resultados de ensaios laboratoriais não drenados em amostras de pequena dimensão, de ensaios de modelação física na centrífugadora e de simulações numéricas. A modelação física e numérica sugere que a liquefacção de um depósito saturado de areia induzida por um sismo não é um fenómeno totalmente não drenado. Assim, análises baseadas em ensaios laboratoriais não drenados podem conduzir a conclusões irrealistas.

ABSTRACT

Liquefaction of saturated sands is a serious concern in seismic zones, geotechnical designers being increasingly forced to carry out a design based on realistic numerical predictions of the behaviour of the deposit and of the structures built on it. In order to achieve that, it is necessary to identify the mechanisms that control the liquefaction of natural deposits. This paper investigates the fundamental principle that defines liquefaction as an undrained phenomenon, using results of laboratory undrained tests on small samples, results of physical modelling on the centrifuge and results of numerical simulations. The physical and numerical modelling suggests that the liquefaction of a saturated deposit of sand induced by an earthquake is not a totally undrained phenomenon. Thus, analysis based on laboratory undrained tests may lead to unrealistic conclusions.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos resultantes da ocorrência de liquefacção induzida por acções sísmicas sobre estruturas construídas em solos granulares saturados constituem uma preocupação significativa para os engenheiros geotécnicos envolvidos no dimensionamento, nomeadamente em zonas sísmicas. A metodologia presentemente utilizada em projectos geotécnicos que requeiram a consideração da possibilidade de ocorrência de liquefacção baseia-se em critérios semi-empíricos, os quais foram desenvolvidos fundamentalmente com base na análise de casos históricos e de resultados

de ensaios laboratoriais não drenados realizados sobre amostras de pequena dimensão. Relativamente aos ensaios laboratoriais, o aparelho triaxial foi, sobretudo nos primórdios da investigação neste campo, o equipamento laboratorial de eleição para o estudo do fenómeno da geração de pressões neutras em solos granulares saturados sujeitos a acções cíclicas.

A mais recente filosofia de dimensionamento para problemas geotécnicos envolvendo a ocorrência de liquefacção induzida por acções sísmicas, cuja formulação e promoção tem sido levada a cabo pelo Comité Técnico TC4 da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica [1], estabelece que o dimensionamento deve ser baseado numa previsão realista e detalhada do desempenho da estrutura durante e após o sismo. O designado dimensionamento baseado no desempenho (“Performance based design”) exige contudo um conhecimento sobre os fenómenos que ocorrem num maciço granular saturado sujeito a uma acção sísmica que não é compatível com métodos semi-empíricos que se limitam a prever de forma relativamente grosseira a possibilidade de ocorrência ou não de liquefacção e eventualmente os seus efeitos. Este requer antes sofisticados métodos numéricos para uma previsão relativamente precisa do comportamento das estruturas durante acções sísmicas produzindo a liquefacção do maciço de fundação. São porém conhecidas as enormes limitações dos meios numéricos actualmente disponíveis para previsão do comportamento geotécnico em casos que envolvam liquefacção, como ficou sobejamente demonstrado através dos resultados do Projecto VELACS- VERification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies- [2]. Recorde-se que algumas das simulações numéricas realizadas antes da execução dos ensaios na centrifugadora produziram previsões para o comportamento dos modelos completamente contraditórias com as posteriormente observadas nos modelos físicos. Algumas das discrepâncias notadas, nomeadamente no que se refere à propagação da liquefacção no depósito, levam mesmo a questionar se os mecanismos básicos aceites para o fenómeno da liquefacção de areias se encontram de facto convenientemente esclarecidos.

A clarificação dos mecanismos que determinam o comportamento de um maciço granular saturado, durante uma acção dinâmica capaz de gerar excesso de pressão neutra significativo, assume uma importância fundamental caso a filosofia de dimensionamento geotécnico baseada no desempenho se pretenda implementar de forma séria. Tal clarificação permitirá calibrar e avaliar a potencialidade dos modelos numéricos existentes, assim como rejeitar ou reformular aqueles que não sejam capazes de reproduzir os mecanismos com maior influência no comportamento. O presente artigo pretende discutir um dos princípios básicos usualmente aceites no estudo da liquefacção de areias: aquele que sustenta que o facto de a acção sísmica ser muito curta permite considerar que a sua aplicação ocorre em condições não drenadas, mesmo num material de permeabilidade relativamente alta. Resultados de ensaios laboratoriais em amostras de pequena dimensão, de ensaios de modelação física na centrifugadora e de simulações numéricas são comparados para investigar a validade de tal hipótese.

2. LIQUEFACÇÃO ENQUANTO FENÓMENO NÃO DRENADO

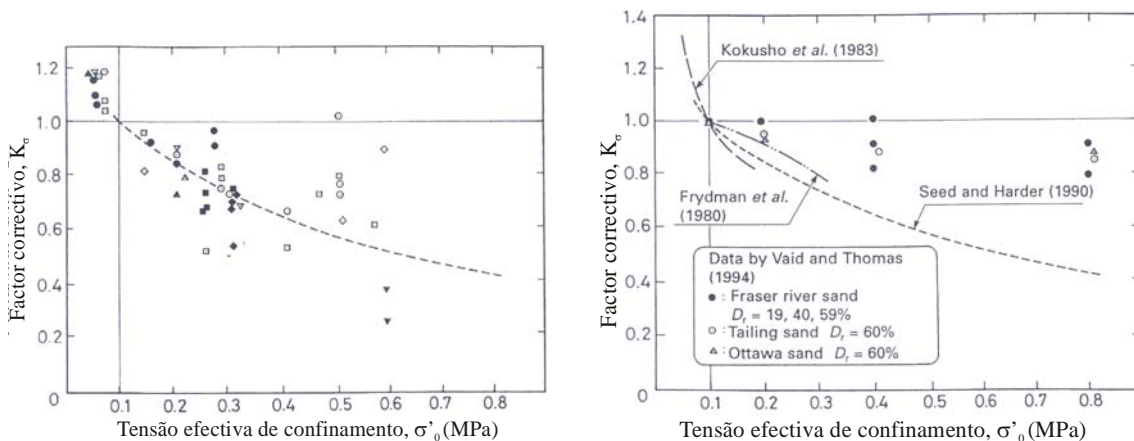
A descrição da liquefacção como um fenómeno não drenado terá provavelmente origem no facto de se ter observado que a geração de pressão neutra induzida em depósitos granulares saturados durante acções sísmicas reais podia ser globalmente reproduzida em ensaios triaxiais cíclicos não drenados. Naturalmente que o fenómeno de liquefacção nunca poderia ser reproduzido em ensaios drenados, onde por definição a pressão neutra é forçada a manter valor constante. O facto de a acção dinâmica ter uma duração extremamente curta permitiu aceitar que, apesar dos depósitos granulares possuírem alta permeabilidade, o fluxo de água no solo não tivesse importância fundamental no desenvolvimento do fenómeno de liquefacção. Nenhuma das razões apontadas permite contudo afirmar, com absoluta certeza, que a liquefacção resulta da solitação dinâmica do solo em condições totalmente não drenadas.

2.1. Liquefacção em depósitos naturais

Não existem, infelizmente, dados detalhados sobre a forma como se produz a liquefacção de maciços granulares naturais saturados durante acções sísmicas reais. Tal resulta do carácter imprevisível destas acções, tanto no tempo como no espaço, o que condiciona a criação e a manutenção de sítios instrumentados durante períodos de tempo suficientemente longos para a captação de uma acção sísmica relevante. Porém, caso um projectista actual tivesse necessidade de descrever a forma como a liquefacção se inicia e se propaga num depósito, a resposta seria previsivelmente elaborada com base no procedimento para avaliação do potencial de liquefacção de uma areia originalmente estabelecido por Seed & Idriss [3]. Tal procedimento, que foi progressivamente actualizado até à sua versão mais recente [4], requer a consideração de um factor correctivo para a resistência do solo à liquefacção durante acções cíclicas, o qual pretende levar em conta o nível de tensão efectiva presente do solo. O factor correctivo K_σ , que corrige o valor da resistência cíclica normalizada do solo relativamente ao valor normalmente estabelecido para uma tensão de referência de 100 kPa, é definido por:

$$K_\sigma = \frac{\left(\frac{\tau_d}{\sigma'_{v0}} \right)_{\sigma'_{ref}(actual)}}{\left(\frac{\tau_d}{\sigma'_{v0}} \right)_{\sigma'_{ref}=100kPa}} \quad (1)$$

A variação de K_σ com a tensão de confinamento proposta por diferentes autores é ilustrada na Figura 1. Apesar de uma variabilidade de resultados significativa, qualquer das propostas ilustrada implica que a resistência de um solo saturado à liquefacção durante acções cíclicas tende a aumentar de forma mais ou menos significativa com o decréscimo da tensão de confinamento. Tal significa que, num depósito granular saturado sujeito a uma acção dinâmica que produza um rácio τ/σ'_{v0} idêntico a cada profundidade, a liquefacção tende a ocorrer inicialmente a maiores profundidades e só posteriormente se estende até à superfície. Recorde-se porém que tal conclusão resulta unicamente da análise do método de dimensionamento proposto, o qual se baseia em ensaios laboratoriais não drenados em que o princípio tido como fundamental de o solo ser dinamicamente solicitado em condições não drenadas é imposto.



a) proposta original de Seed & Harder [5]

b) comparação de diferentes propostas [6]

Figura 1- Factor correctivo relativo à tensão de confinamento para avaliação do potencial de liquefacção de areias sob acções sísmicas.

2.2. Liquefacção em ensaios triaxiais cíclicos não drenados

Tendo em conta que o procedimento para avaliação do potencial de liquefacção de uma areia proposto por Seed & Idriss [3] se baseia parcialmente em resultados de ensaios triaxiais não drenados, não será de estranhar que estes gerem conclusões idênticas às apresentadas na secção anterior. A Figura 2 apresenta resultados de ensaios triaxiais cíclicos não drenados realizados sobre amostras de Fracção E de areia de Leighton Buzzard, no Laboratório de Geotecnia e Ambiente da Universidade de Cambridge, UK. Os dois ensaios foram realizados sobre amostras preparadas por pluviação seca, com igual densidade relativa (50 %), que após saturação e consolidação sob diferentes tensões foram submetidas a ensaios triaxiais cíclicos não drenados em que o rácio $\tau_{\max}/\sigma_{\text{cons}}$ foi mantido constante. Os resultados mostram que, para o mesmo rácio $\tau_{\max}/\sigma_{\text{cons}}$, a amostra isotropicamente consolidada sob maiores tensões de confinamento exhibe muito menor resistência à liquefacção. De facto, na amostra consolidada sob uma tensão de 120 kPa, a geração de pressão neutra e as deformações associadas são, logo desde o primeiro ciclo de carga, muito maiores do que na amostra consolidada sob uma tensão de 40 kPa.

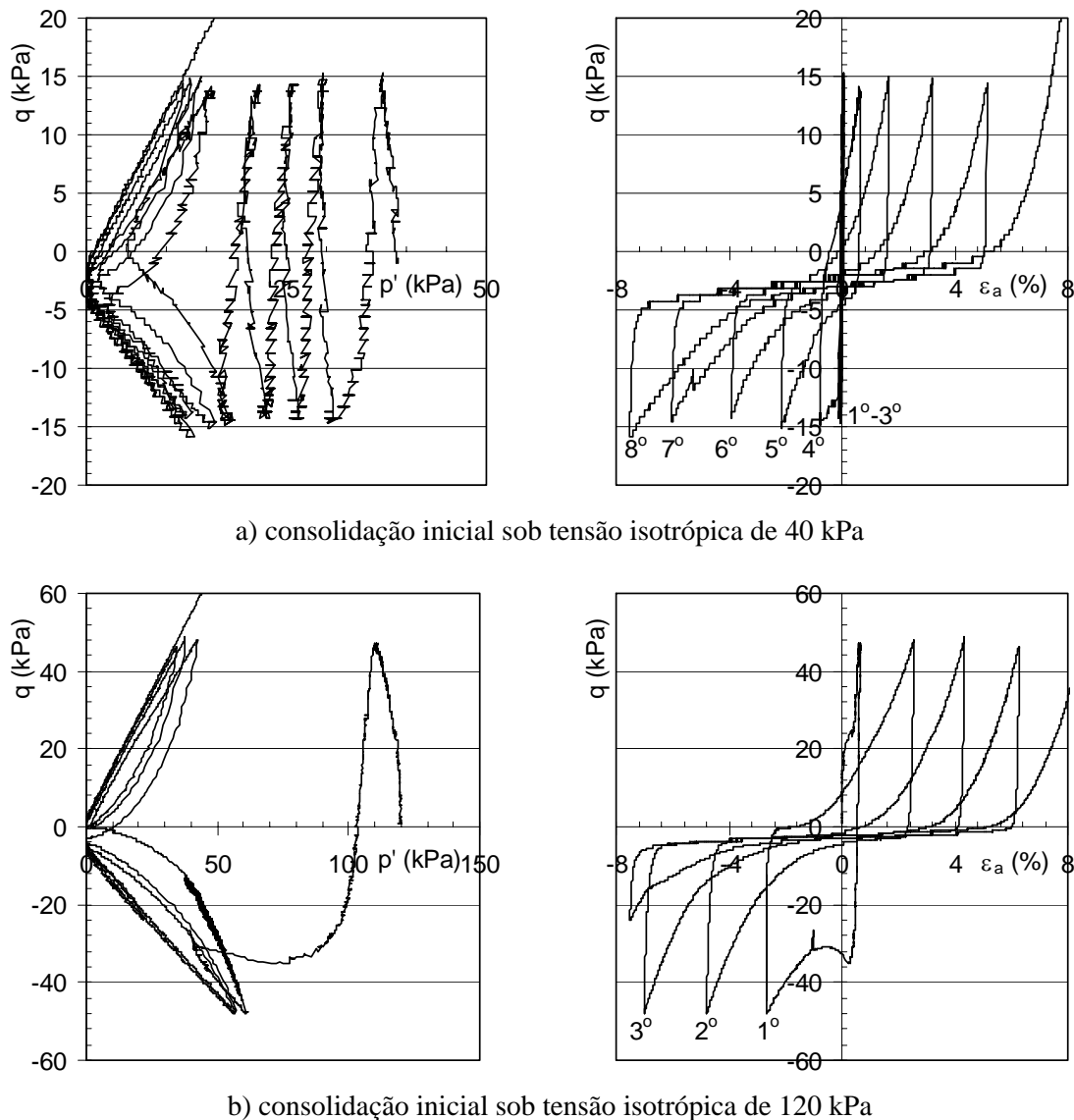


Figura 2- Comportamento de amostras saturadas de Fracção E de areia de Leighton Buzzard ($D_R=50\%$) em ensaios triaxiais cíclicos não drenados

Os resultados dos ensaios triaxiais sugerem assim que, caso a hipótese de não drenagem se verifique, num depósito de areia saturada sujeito a uma acção sísmica que produza liquefacção, esta se inicie a maiores profundidades. Posteriormente, a liquefacção poderá estender-se a zonas onde a existência de uma menor tensão de confinamento retarda a ocorrência do fenómeno.

3. LIQUEFACÇÃO ENQUANTO FENÓMENO PARCIALMENTE DRENADO

A questão do fluxo de água no contexto da liquefacção é por vezes equacionada quando se considera o problema da migração do excesso de pressão neutra após o fim da acção sísmica. Esse fenómeno é frequentemente apontado como um mecanismo potencialmente relevante nos casos em que a presença de estruturas modifica a geração de pressão neutra no solo de fundação durante o sismo, embora a sua importância e consequências não estejam devidamente quantificadas. Ainda assim, não é usual referir este fenómeno como significativo quando se avalia a geração de pressão neutra num depósito durante uma acção sísmica, considerando-se antes que esta ocorre em condições absolutamente não drenadas.

3.1. Liquefacção em modelos físicos na centrífugadora

A importância da modelação física na centrífugadora em geotecnia encontra-se devidamente documentada [7, 8, 9], tanto para problemas estáticos como dinâmicos. Neste último caso, a possibilidade de observar em detalhe o comportamento do solo em condições controladas e sob um estado de tensão idêntico ao presente no campo é particularmente bem-vinda, sobretudo porque as observações à escala real são escassas e pouco detalhadas. Esta técnica é ainda aceite como um complemento particularmente importante das técnicas numéricas [10]. No caso particular da liquefacção, embora as ferramentas numéricas actualmente disponíveis possuam frequentemente formulações que lhes conferem o potencial para simular problemas envolvendo grandes deformações e amolecimento induzido por geração generalizada de pressões neutras durante acções cíclicas, a sua aplicação na prática é limitada pelas dificuldades em quantificar os parâmetros envolvidos [11] e em calibrar os modelos num ambiente comercial [12].

Aceitando a validade da modelação física na centrífugadora, as conclusões apresentadas nas secções anteriores podem ser comparadas com as inferidas do comportamento de modelos ensaiados dinamicamente na centrífugadora, desde que as condições de fronteira sejam devidamente implementadas e as leis de escala correctamente aplicadas. A Figura 3 ilustra a geração de pressões neutras a diferentes profundidades num modelo sujeito, na centrífugadora, a simulações sísmicas. São apresentadas as medições registadas durante a primeira e a última de um conjunto de 5 simulações sísmicas sucessivas de igual duração e magnitude idêntica ou ligeiramente crescente. Os resultados mostram que, durante a primeira simulação sísmica, não existe uma diferença significativa na velocidade de geração de pressão neutra a diferentes níveis no modelo: o excesso de pressão neutra gerado na areia saturada sujeita a tensões efectivas verticais iniciais entre 59 e 120 kPa, devido a uma acção dinâmica aplicada na base do modelo, é muito semelhante. No caso da 5ª simulação sísmica, a conclusão é idêntica, excepto no caso da maior profundidade representada, onde a taxa de crescimento de excesso de pressão neutra com o tempo durante a simulação sísmica é menor. Estas observações são claramente contrárias às resultantes da análise de resultados de ensaios triaxiais realizados em condições não drenadas, onde, como se descreveu na secção anterior, se verifica um decréscimo da resistência cíclica de areias saturadas com o aumento de tensão de consolidação inicial. Uma das razões para a discrepância encontrada relativamente à influência da tensão de confinamento sobre a geração de pressões neutras pode residir no facto de a sollicitação dinâmica não ser aplicada em condições absolutamente não drenadas, pois um fluxo ascendente gerado em profundidade pode contribuir decisivamente para o aumento da pressão neutra junto à superfície do depósito.

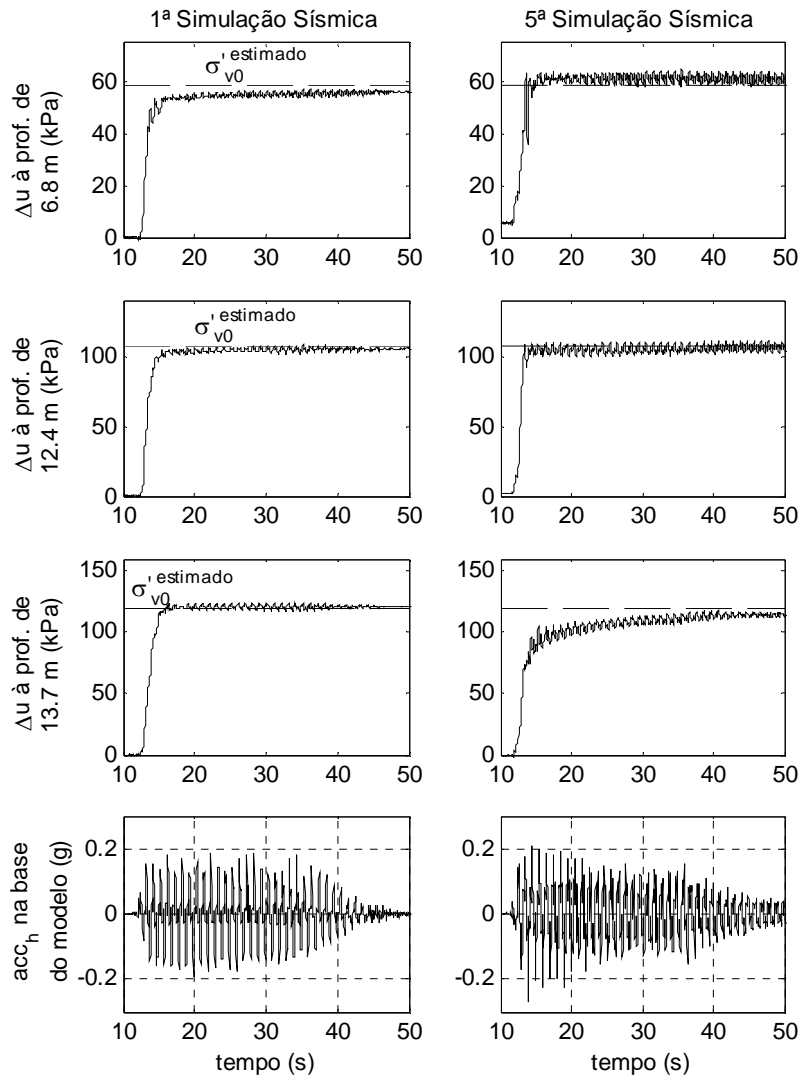


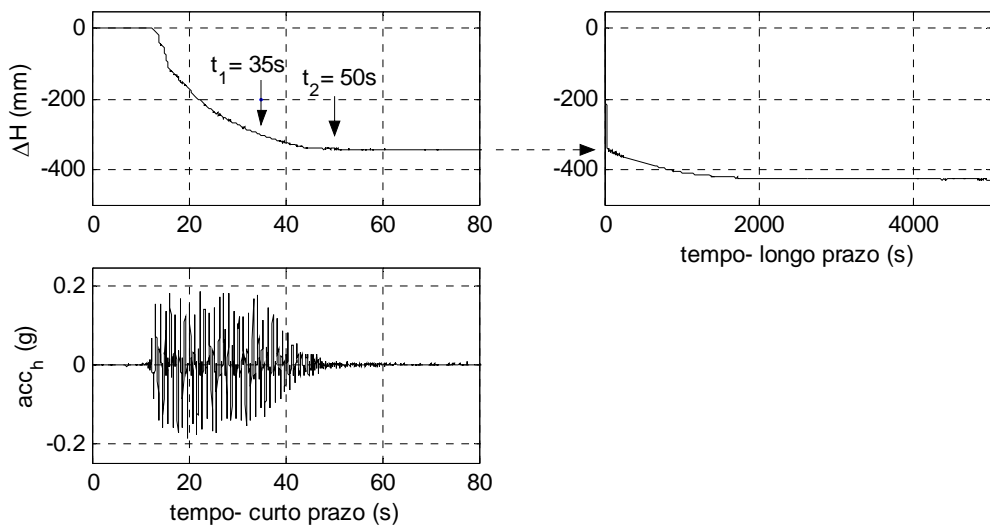
Figura 3- Geração de pressão neutra em simulações sísmicas num modelo físico representando um depósito uniforme e saturado de Fracção E de areia de Leighton Buzzard ($D_R=50\%$)

A Figura 4 mostra, para a primeira simulação sísmica, os assentamentos à superfície a curto e longo prazos e ainda o perfil de pressões neutras medido em profundidade relativamente a dois instantes indicados na figura: um imediatamente antes (t_1) e outro imediatamente após (t_2) o fim do sismo. A figura 4.a mostra que o assentamento total da superfície do depósito causado por liquefacção induzida pela simulação sísmica é muito significativo, atingindo aproximadamente 430 mm. Mais relevante ainda é o facto de a esmagadora maioria desse assentamento, mais propriamente cerca de 80 %, ter lugar durante a acção sísmica. Tal resultado demonstra que a liquefacção induzida num modelo físico não pode ser classificada como um fenómeno puramente não drenado. De facto, se o assentamento da superfície do depósito saturado é consequência da redução do volume de vazios da areia, tal implica expulsão de água dos vazios durante a simulação sísmica, o que é incompatível com uma condição não drenada. Outra observação significativa diz respeito ao coeficiente de permeabilidade que caracteriza um maciço sujeito a liquefacção induzida por uma acção dinâmica. Conforme se deduz da evolução dos assentamentos a longo prazo (figura 4.a), existe uma redução brusca da velocidade de assentamento assim que termina a simulação sísmica. Em particular, verifica-se que a taxa de incremento do assentamento com o tempo se reduz de um valor de aproximadamente 5 mm/s, no instante t_1 , para cerca de 0.25 mm/s, no instante t_2 . Assim, tendo em conta que a taxa de

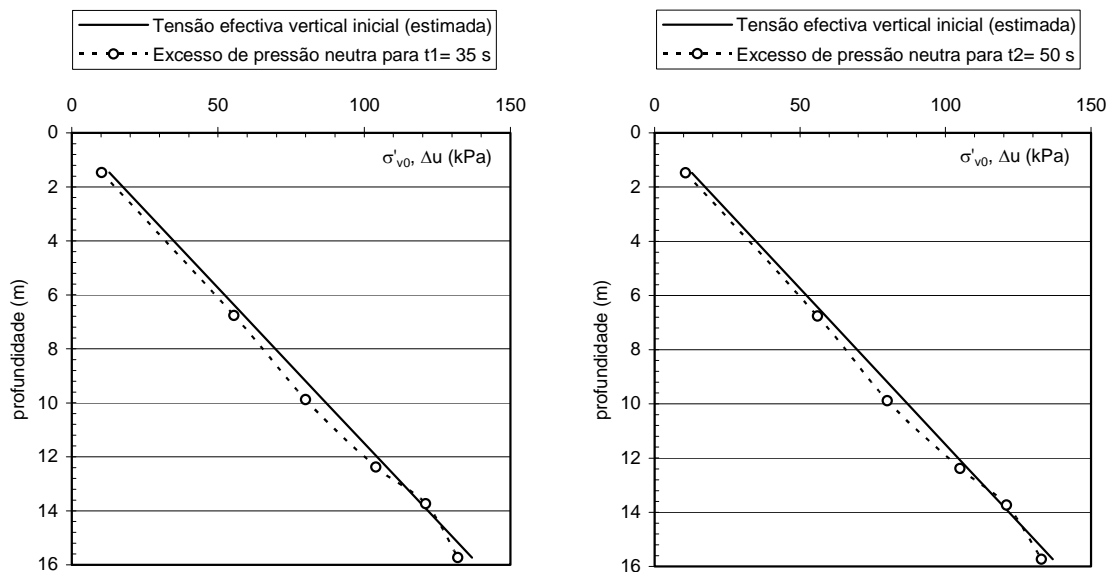
incremento do assentamento com o tempo mede o caudal de água afluente à superfície do depósito e ainda que os perfis do gradiente hidráulico gerado no maciço nos instantes t_1 e t_2 são idênticos (Figura 4.b), pode-se deduzir que, durante a simulação sísmica, ou a lei de Darcy não é válida ou o coeficiente de permeabilidade da areia é pelo menos 20 vezes superior ao que se verifica após o fim do sismo. Esta conclusão é de algum modo semelhante à formulada de forma qualitativa por Ishihara [13], tendo por base os resultados do modelo 1 do programa VELACS.

3.2. Liquefacção em simulações numéricas

Alguns resultados de modelação numérica têm igualmente contribuído para discutir a validade da hipótese de não drenagem em liquefacção, embora a simulação numérica de ensaios laboratoriais realizados em condições não drenadas impostas seja naturalmente irrelevante.

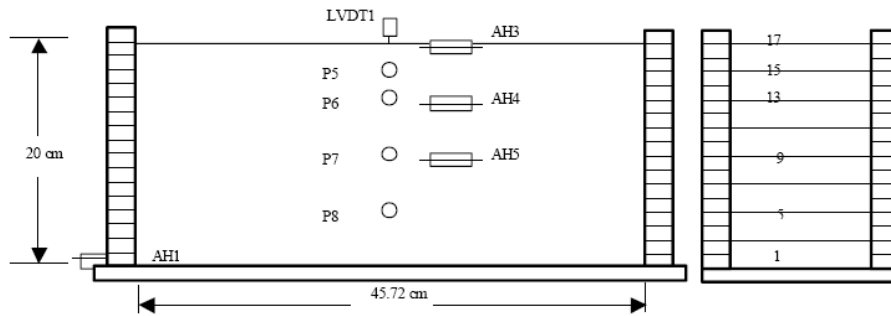


a) assentamento da superfície do depósito a curto e longo prazos

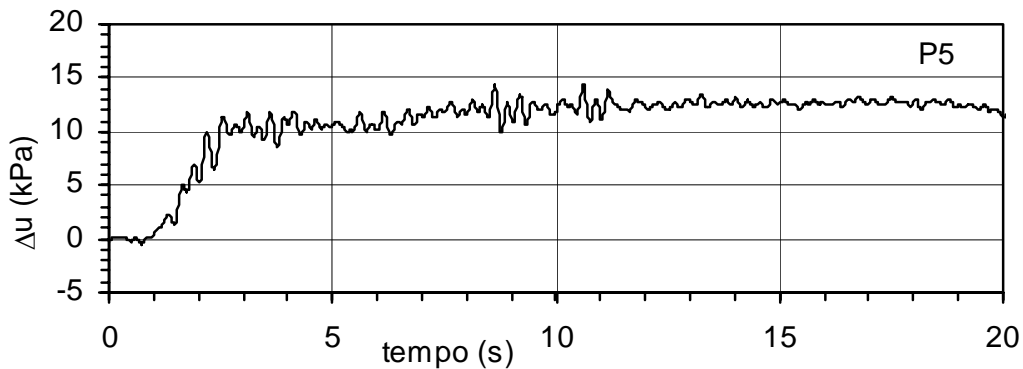


b) perfil em profundidade do excesso de pressão neutra nos instantes $t_1=35$ s e $t_2=50$ s

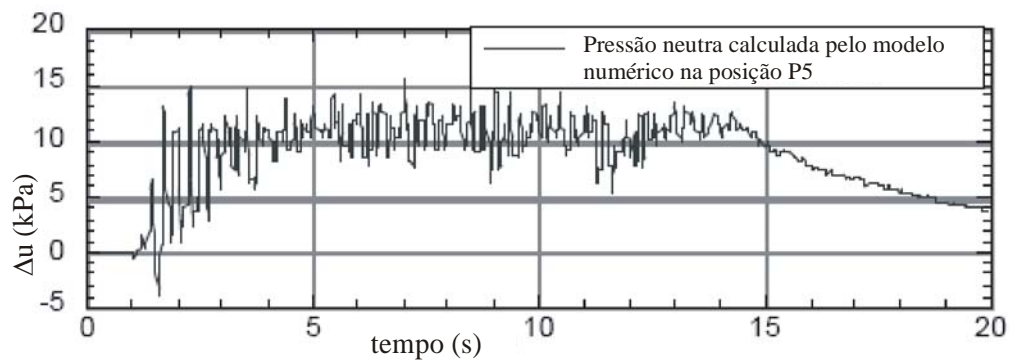
Figura 4- Assentamento e excesso de pressão neutra no modelo devido à 1ª simulação sísmica



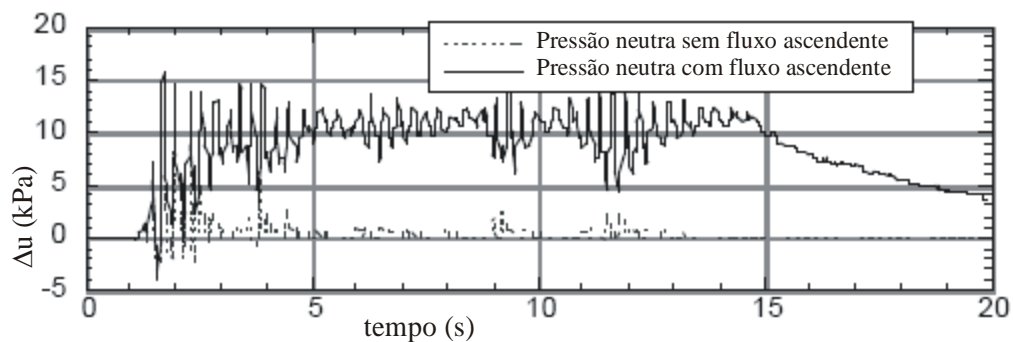
a) modelo físico [14], à esquerda, e malha de elementos finitos [15], à direita, usados na análise



b) excesso de pressão neutra em P5 medido durante o sismo no modelo físico [14]



c) excesso de pressão neutra em P5 previsto durante o sismo pelo modelo numérico [15]



d) modelação numérica do excesso de pressão neutra considerando apenas a zona superficial do depósito sujeita à acção dinâmica na base deduzida da análise numérica completa [15]

Figura 5- Comparação da geração de pressão neutra na zona superficial de um depósito de areia saturada sujeito a acção sísmica obtido por modelação numérica e modelação na centrífugadora

A Figura 5 compara as observações do excesso de pressão neutra gerado por um sismo no modelo 1 de areia saturada do projecto VELACS [14] com os resultados da simulação numérica realizada através de um programa de elementos finitos que permite análise acoplada não linear em termos de tensões efectivas, utilizando o modelo constitutivo de Manzari e Dafalias [15]. A figura mostra que, utilizando parâmetros calibrados com base em ensaios laboratoriais monotónicos e cíclicos, é possível reproduzir razoavelmente o excesso de pressão neutra medido (b) usando modelação numérica (c). A Figura 5.d mostra ainda os resultados de uma simulação numérica do excesso de pressão neutra da zona superficial considerando apenas o elemento superior da malha de elementos finitos e aplicando na base deste a acção dinâmica deduzida da simulação numérica completa. Verifica-se que os resultados só são satisfatórios caso um fluxo vertical ascendente, actuando em conjunto com a acção dinâmica, seja imposto na fronteira inferior do modelo numérico. Estes resultados sugerem assim que, pelo menos junto à superfície do depósito, a liquefacção seja determinada pela acção conjunta da acção dinâmica e da migração ascendente de excesso de pressão neutra gerado a maior profundidade.

A Figura 5 mostra ainda que, embora a simulação numérica reproduza satisfatoriamente o excesso de pressão neutra gerado durante o sismo, ela determina uma dissipação de pressões mais rápida do que a observada no modelo físico. Tal limitação pode não ser alheia ao facto de a permeabilidade do depósito poder aumentar significativamente durante o sismo, pelo que uma simulação numérica que ignore tal possibilidade e que preveja de forma correcta o comportamento do maciço durante o sismo, irá sobrestimar necessariamente a velocidade de dissipação do excesso de pressão neutra pós-sismo. De notar ainda que o aumento da permeabilidade de um depósito liquefeito foi já objecto de estudo numérico através de modelos baseados em hipoplasticidade, tendo sido demonstrada a possibilidade de formação de tubos verticais que aumentam significativamente a permeabilidade global do maciço [16].

4. CONCLUSÕES

A análise conjugada de resultados de ensaios laboratoriais em amostras de pequena dimensão, de ensaios de modelação física na centrífugadora e de simulações numéricas foi utilizada para investigar a validade da hipótese, usualmente aceite relativamente ao fenómeno da liquefacção, de que este é um fenómeno não drenado. Os resultados apresentados mostram que existem discrepâncias significativas entre o comportamento de um maciço sujeito a liquefacção quando previsto por diferentes técnicas. Em particular, verificou-se, quer através de ensaios dinâmicos de modelos físicos na centrífugadora, quer de simulações numéricas, que a liquefacção não parece ser um fenómeno totalmente não drenado. De facto, foi demonstrado que, num modelo físico, o assentamento ocorre sobretudo durante o período da acção sísmica e que, ao contrário do sugerido pelos resultados de ensaios não drenados, a liquefacção parece ter início junto à superfície e só depois se propaga a maiores profundidades. A modelação física sugere também que a permeabilidade do depósito pode crescer, durante o sismo, para valores pelo menos 20 vezes superiores aos presentes em condições estáticas. De notar que, embora estas conclusões contrariem o actualmente estabelecido relativamente ao fenómeno de liquefacção e não possam ser confirmadas por ensaios laboratoriais em que a condição de não drenagem é artificialmente imposta, elas têm sido progressivamente confirmadas por análises numéricas avançadas. A ser assim, os resultados de ensaios laboratoriais não drenados devem ser considerados com cuidado.

A filosofia de dimensionamento relativamente a problemas de liquefacção baseada no desempenho só pode ser seriamente implementada através de análises numéricas fiáveis que reproduzam os aspectos mais significativos do fenómeno de liquefacção. Para que tal seja possível, é necessário clarificar os mecanismos que causam a liquefacção de depósitos naturais de areia, esclarecendo em particular a importância do fluxo ascendente de água na redução do estado de tensão efectiva nas zonas superiores do depósito, a qual é actualmente ignorada.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Finn, W.D.L. Preface to Performance based design in earthquake geotechnical engineering: concepts and research. Proc. Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conf., Osaka, Japan (2005): i.
- [2] Scott, R.F. Lessons learned from VELACS project. Arulanandan & Scott (eds) Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Balkema, Rotterdam (1994): 1773-1784.
- [3] Seed, H.B. & Idriss, I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J. Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, 97:SM9 (1971): 1249-1273.
- [4] Idriss, I.M. & Boulanger, R.W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proc. 11th Int. Conf. Soil Dynamics & Earthquake Engineering & 3rd Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, California, US (2004): 32-56.
- [5] Seed, R.B. & Harder, L.F. SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength. J.M. Duncan (ed), Proc. H. Bolton Seed Memorial Symp., Vol. 2 (1990): 351-376.
- [6] Ishihara, K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Tokyo, Oxford University Press, New York (1996), 360 pp.
- [7] Schofield, A.N.. Cambridge geotechnical centrifuge operations. 20th Rankine Lecture. Geotechnique, 30:3 (1980): 227-268.
- [8] Schofield, A.N. Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modelling. Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Vol. 3 (1981): 1081-1100.
- [9] Schofield, A.N. Geotechnical centrifuge development can correct soil mechanics errors. Proc. Int. Conf. Centrifuge 98, Tokyo, Japan, Balkema, Rotterdam, Vol. II (1998).
- [10] Randolph, M.F. & House, A.R. The complementary roles of physical and computational modelling. Int. J. of Physical Modelling and Geotechnics, 1:1 (2001): 1-8.
- [11] Kramer, S.L. & Paulsen, S.B. Practical use of geotechnical site response models. Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, March 2004, PEER Headquarters, UC Berkeley, US. (2004).
- [12] Finn, W.D.L. Nonlinear soil properties and their use in dynamic analysis. Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, March 2004, PEER Headquarters, UC Berkeley, US. (2004).
- [13] Ishihara, K. Review of the predictions for Model 1 in the VELACS program Arulanandan & Scott (eds) Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Balkema, Rotterdam (1994)
- [14] Taboada V.M. & Dobry R. Experimental results of Model No 1 at RPI. Arulanandan & Scott (eds) Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Balkema, Rotterdam (1994): 3-17.
- [15] Prachathananukit, R. & Manzari, M.T. Significance of pore water flow in soil liquefaction analysis, Proc. EM2000- 14th Eng. Mech. Conf. ASCE, May 2000, Austin Texas, US (2000).
- [16] Gudehus G. Seismic decay of psammoids and peloids with and without hypoplasticity. Intern. Conf. on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Bochum, Germany (2004): 11-20.