

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À LIQUEFAÇÃO CÍCLICA EM ENSAIOS LABORATORIAIS EM SOLOS LIQUIDIFICÁVEIS DO VALE DO TEJO INFERIOR

EVALUATION OF CYCLIC LIQUEFACTION RESISTANCE FROM LABORATORY TESTS ON LIQUEFIABLE SOILS FROM THE LOWER TAGUS VALEY

Ramos, Catarina; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, catarinacorreiaramos@gmail.com*

Viana da Fonseca, António; *CONSTRUCT-GEO, FEUP, Porto, Portugal, viana@fe.up.pt*

Coelho, Daniela; *FEUP, Porto, Portugal, danielac@fe.up.pt*

RESUMO

Em Portugal continental, o risco sísmico é particularmente relevante nas zonas costeiras a Sul e Sudoeste, principalmente no vale do rio Tejo e na região do Algarve. O Vale do rio Tejo inferior (na terminologia anglo-saxónica: "Lower Tagus Valley, LTV") tem sido afetada por vários terremotos ao longo da história e também recentemente, que causaram graves danos materiais e perda de vidas humanas. Esta área tem sido estudada pela sua elevada suscetibilidade ao fenómeno da liquefação, devido às condições geológicas e geomorfológicas e à sismicidade associada à região. No âmbito do projeto de investigação europeu H2020 LIQUEFACT e do projeto nacional apoiado pela FCT, Liq2ProEarth, um sítio piloto foi selecionado na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, onde se realizou um vasto conjunto de ensaios de campo e foram recolhidas amostras "indeformadas" e integrais para posterior caracterização em laboratório. A realização de ensaios laboratoriais nestes materiais é determinante para a avaliação do seu comportamento geomecânico em diferentes cenários de ação sísmica e consequente definição dos parâmetros necessários para os modelos usados nas análises numéricas para avaliação do comportamento dos terrenos com solos liquidificáveis em caso de ocorrência de sismos. O estudo apresentado neste artigo foca a comparação de resultados obtidos por procedimentos de ensaios distintos realizados em diferentes materiais recolhidos no campo experimental. Foram realizados ensaios triaxiais cíclicos, com inversão das tensões principais, e ensaios de corte simples cíclico, que permitem rotação das tensões principais, com diferentes valores de CSR (razão de tensão cíclica) cujo objetivo foi obter as curvas de suscetibilidade de cada material. Os ensaios investigam a influência do conteúdo de finos e da ação sísmica (caracterizada pelo CSR) no comportamento de solos submetidos a carregamento cíclico.

ABSTRACT

In mainland Portugal, seismic risk is particularly relevant in the south-west and south costal zones, mainly in the Tagus River Valley and the Algarve region. The Lower Tagus Valley (LTV) has been affected by several earthquakes throughout history and also recently, which have caused serious material damages and loss of human lives. This area has been studied for its high susceptibility to the liquefaction phenomenon due to its geological and geomorphological conditions and the seismicity associated to the region. Within the scope of the European research project H2020 LIQUEFACT and the national project supported by FCT, Liq2ProEarth, a pilot site was selected in Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, where a vast set of *in situ* tests were carried out and undisturbed samples were collected for later characterization in the laboratory. The performance of laboratory tests in these materials is determinant for the evaluation of its geomechanical behaviour in different seismic action scenarios and consequent definition of the necessary model parameters used in numerical analyses to evaluate the behaviour of the land with liquefiable soils in the event of an earthquake. The study presented in this article focuses on the comparison of results obtained by different test procedures performed on different materials collected in the experimental site. Cyclic triaxial tests, with inversion of principal stresses, and cyclic simple shear test, which allow the rotation of the principal stresses, were performed with different values of Cyclic Stress Ratio (CSR), whose objective was the determination of liquefaction susceptibility curves for each material. The tests investigate the influence of fines content and seismic action (characterized by CSR) on the behaviour of soils subjected to cyclic loading.

1- INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, a zona inferior do Vale do Tejo, localizada na região de Lisboa, em Portugal, tem sido afetada por vários terremotos que causaram sérios danos materiais e perda de vidas humanas. Devido às condições geológicas e geomorfológicas que se verificam no local e à sismicidade associada à região, esta área tem sido estudada devido ao seu elevado risco de ocorrência de liquefação relacionada com carregamentos cíclicos. No âmbito do projeto Europeu do H2020, LIQUEFACT e do projeto nacional apoiado pela FCT, Liq2ProEarth, foi selecionado um campo experimental piloto na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, localizado próximo do município de Benavente, onde ocorreu um terremoto em 1909 no qual foram

testemunhados vários fenômenos associados à liquefação dos solos. Neste campo experimental realizou-se uma extensa campanha de ensaios de campo (tanto geotécnicos como geofísicos) e foram recolhidas amostras "indeformadas" para posterior análise em laboratório. O presente trabalho é um contributo para os estudos que estão a ser desenvolvidos, uma vez que a caracterização do comportamento dos solos sujeitos a carregamentos cíclicos e o estudo da suscetibilidade dos solos à liquefação são essenciais para a compreensão do fenómeno e para a possível identificação de medidas de mitigação no caso de ocorrência de sismos.

O critério de suscetibilidade à liquefação mais comumente utilizado foi proposto por Whitman (1971) e Seed e Idriss (1971) e permite definir o fator de segurança à liquefação relacionando dois rácios de tensões (equação 1). O método, conhecido como "Método simplificado de Seed-Idriss", sofreu algumas alterações ao longo dos anos mas mantém a sua forma geral inalterada. O fator de segurança à liquefação é obtido através do rácio entre a razão de resistência cíclica (CRR – *Cyclic Resistance Ratio*) e a razão de tensão cíclica (CSR – *Cyclic Stress Ratio*). O CSR representa uma medida da carga provocada por um movimento sísmico enquanto o CRR avalia a capacidade de resistência do solo à liquefação.

$$FS_{liq} = CRR/CSR \quad [1]$$

Há vários fatores que influenciam a resistência cíclica à liquefação, nomeadamente a amplitude da carga, o tipo de solo, as condições de tensão iniciais, a amplitude das deformações, a idade e cimentação dos solos ou as condições hidráulicas (NASEM, 2016).

A simulação das condições das tensões *in situ* e do movimento provocado por um sismo tem sido um desafio e dos principais assuntos relacionados com a investigação na área da liquefação. Existem alguns ensaios de laboratório que permitem simular as condições de campo, tais como os ensaios de corte simples em amostras consolidadas em condições anisotrópicas ($K_0 = \sigma'_h/\sigma'_v$). As primeiras simulações para potenciar liquefação através de carregamento cíclico foram realizadas por Seed e Lee (1966) em condições triaxiais e demonstraram que o mecanismo chave para liquefação sísmica em condições não-drenadas era o aumento de 100% na pressão de água nos poros (Kokusho, 2017).

Seed e Peacock (1971) compararam resultados de ensaios triaxial em condições isotrópicas e ensaios de corte simples consolidados em K_0 , propondo a equação 2 que relaciona o CSR dos dois tipos de ensaio. O coeficiente c_r relaciona os dois rácios de tensão e foi determinado como sendo 0.55-0.70 para areias limpas com densidade relativas entre 40% e 85%.

$$CSR_{ss} = c_r \cdot CSR_{tx} \quad [2]$$

Este parâmetro foi estudado por vários autores, que sugerem valores distintos conforme as condições de consolidação dos ensaios. Kramer (1996) apresenta uma tabela resumo em que para valores de $K_0=0.4$, o c_r varia entre 0.55 e 0.72 e para $K_0=1.0$ (condições isotrópicas) c_r é 1.0 (Finn et al., 1971, Seed e Peacock, 1971) ou 1.15 (Castro, 1975). Ishihara e Yasuda (1975) compararam os resultados dos dois tipos de teste realizados em amostras consolidadas em condições isotrópicas em areia limpa do rio Fuji e concluíram que as curvas de CSR com o número de ciclos requeridos para liquefação (aumento de 100% na pressão de água nos poros) são bastante coincidentes, mostrando que para ensaios realizados em condições isotrópicas o parâmetro c_r é 1.0, não se verificando grandes diferenças na resistência à liquefação.

Apesar de ser um assunto bastante controverso, outro fator que influencia a resistência de um solo à liquefação é o conteúdo em finos. Alguns autores defendem que a resistência à liquefação diminui com o aumento do teor de finos até um valor limite, a partir do qual a resistência à liquefação começa a aumentar (Polito e Martin, 2001, Thevanayagam, 2007 ou Huang e Chuang, 2011). Existem algumas explicações sobre a resistência à liquefação das areias dependendo do seu conteúdo em finos, entre elas o "conteúdo de silte limite" proposta por Polito e Martin (2001) e a "razão de vazios intergranular" proposta por Thevanayagam (2007) e Thevanayagam et al. (2016).

A frequência dos ciclos de carregamento também influencia a resistência de um solo à liquefação. Chang et al. (1982) realizaram ensaios triaxiais cíclicos em amostras de areia Monterey No.0 e concluíram que um aumento da frequência dos ciclos faz aumentar o número de ciclos necessários para ocorrência de liquefação. Rascol (2009) também estudou o efeito da frequência no carregamento cíclico de um material granular e concluiu que baixas frequências induzem maiores amplitudes de deformação e maior excesso de pressão neutra, conduzindo a um menor número de ciclos necessários para ocorrência de liquefação. Pelo contrário, Dash e Sitharam (2016) discutem que o aumento da frequência dos ciclos aumenta a taxa de geração de pressão neutra, o que significa que o número de ciclos necessários para a liquefação diminui com o aumento da frequência.

2- MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho constituem areias com diferentes percentagens de finos e características físicas. Os solos foram recolhidos em campanha de sondagem contratada à empresa Teixeira Duarte Engenharia e Construções S.A., com o amostrador Mazier, que consiste num tubo triplo rotativo com baixo coeficiente de parede e que contém um *liner* de poliéster (Viana da Fonseca e Pineda, 2017). As amostras foram recolhidas no mesmo furo e a profundidades diferentes, sendo que o solo identificado como S1_M2 foi recolhido a 2m de profundidade e o S1_M7 a 7m de profundidade, relativamente à superfície do terreno. O Quadro 1 mostra as propriedades identificativas dos dois materiais, nomeadamente a percentagem de finos, a gravidade específica, os coeficientes de uniformidade e de curvatura e o diâmetro efetivo, D_{50} . Os solos são classificados como areia mal graduada com silte e areia mal graduada pela classificação unificada (ASTM D2487-85).

Quadro 1- Propriedades dos materiais ensaiados

Material	Conteúdo em finos (%)	G_s	C_u	C_c	D_{50} (mm)	Classificação unificada ASTM
S1_M2	9.15	2.651	3.76	1.01	0.32	SP-SM
S1_M7	2.10	2.643	1.81	0.89	0.40	SP

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas dos dois materiais, enquadradas nos limites de suscetibilidade de liquefação definidos por Tsuchida (1970). Ambas as curvas encontram-se dentro desses limites, sugerindo que os materiais tem uma grande suscetibilidade à liquefação.

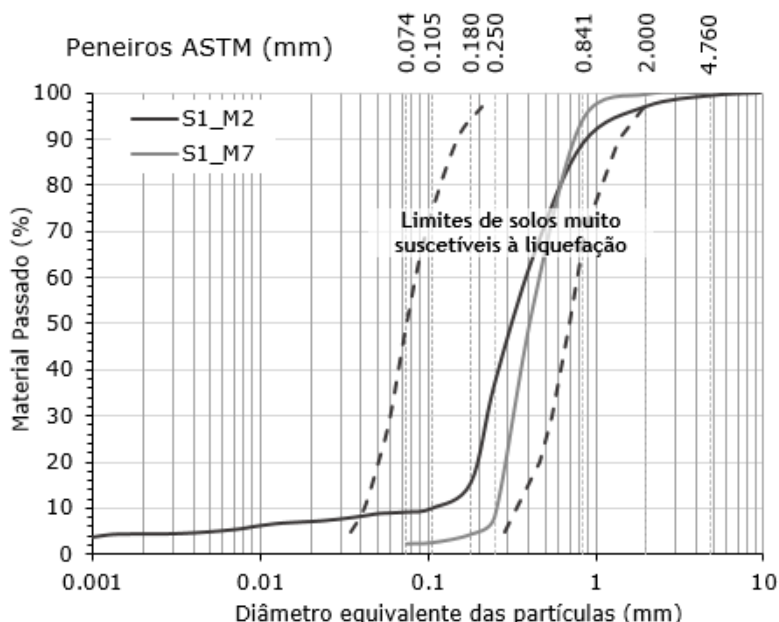


Figura 1 – Curvas granulométricas dos solos estudados

3- PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho envolve ensaios cíclicos em dois tipos de equipamento distintos. Os ensaios de corte simples cíclico foram realizados num equipamento de corte simples cíclico do modelo No. DTA-136 (Seiken, Inc) com um servo controlo pneumático EO-260 que permite a definição de condições de corte cíclico. Estes ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil e Geodética na Universidade de Ljubljana. O equipamento é constituído por três unidades principais: uma unidade de água, que contém quatro tanques (vácuo, água destilada, água para a câmara de confinamento e pressão neutra), reguladores de pressão, um medidor de volume com capacidade de 25ml e um sistema que controla os fluxos de água e ar; uma unidade principal que contém a câmara de confinamento, um atuador pneumático para aplicação de carregamento horizontal, um pistão para aplicação de carregamento vertical e células de carga horizontal e vertical; e uma unidade de controlo com um amplificador, controlador pneumático que permite a definição das condições de corte cíclico, um motor de controlo e o sensor de interface. Uma fotografia do equipamento encontra-se na Figura 2a.

Os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados numa célula triaxial convencional em que o carregamento é efetuado através de uma prensa hidráulica que funciona a óleo e permite controlar deslocamentos ou forças axiais, realizando ciclos de carga-descarga que simulam o carregamento cíclico requerido (Figura 2b). Este

equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Viana da Fonseca et al., 2013). O *software* de controlo e aquisição é o DynaTester V2.0 ® e permite ao utilizador definir as etapas durante o corte (rampas, sinusoidal ou constante).

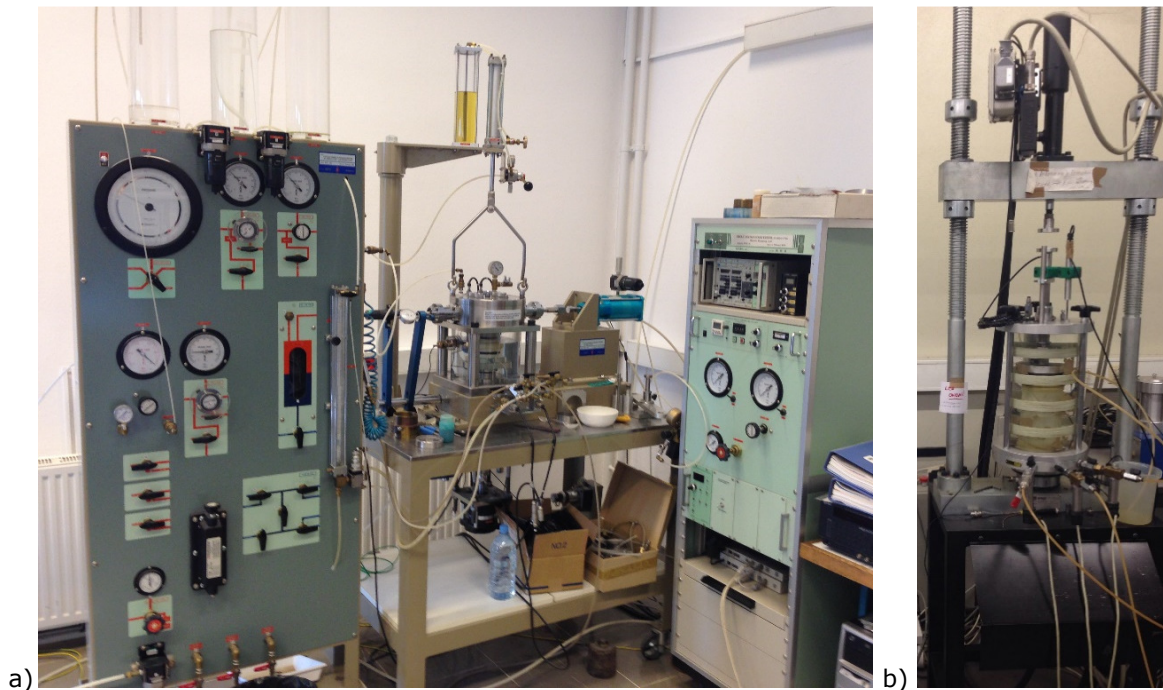


Figura 2 – Equipamentos utilizados: a) ensaios de corte simples cíclico; b) ensaios triaxiais cíclicos

As amostras foram preparadas por compactação manual utilizando a técnica de *moist-tamping*. O teor em água utilizado na compactação foi 5%, que facilita o processo de modo a obter o índice de vazios inicial pretendido. Os provetes para os ensaios triaxiais foram moldados com 70mm de diâmetro e 140mm de altura e para os ensaios de corte simples com 70mm de diâmetro e 30mm de altura.

Os procedimentos que precedem a fase de corte são semelhantes nos ensaios realizados em ambos os equipamentos. Inicialmente foi realizada uma percolação com dióxido de carbono (CO_2) procedida de percolação com água destilada. As amostras foram saturadas até a obtenção de, no mínimo, 0.98 de parâmetro B de Skempton e consolidadas isotropicamente até à tensão de confinamento requerida.

De modo a manter a consistência entre ensaios e a ser possível comparar os resultados sem alteração de muitos parâmetros, a tensão de consolidação aplicada em todos os ensaios foi 70kPa, correspondendo à tensão *in situ* dos provetes recolhidos a 7m de profundidade. Para além disso, o sistema de corte simples não tem precisão suficiente para pequenas pressões, uma vez que oscila cerca de 1 a 2kPa. Assim, se a tensão de confinamento fosse 20 kPa, observar-se-ia uma oscilação de 10%, considerada excessiva nestes ensaios.

A fase de corte difere nos dois tipos de ensaio. Nos ensaios de corte simples cíclico, o corte é controlado em termos de força e induz uma força horizontal aplicada no topo da amostra, enquanto a base está fixa. A frequência dos ciclos adotada foi 0.1 Hz (um ciclo demora 10 segundos a ocorrer). Neste caso, verifica-se a rotação das tensões principais.

Nos ensaios triaxiais cíclicos, a carga é aplicada verticalmente. Na peça colocada no topo da amostra (*top cap*) existe uma membrana de borracha que possibilita a criação de vácuo entre o topo e o pistão de carga e permite a realização da carga axial em ciclos de compressão/extensão, em amostras consolidadas isotropicamente. Os ensaios foram realizados controlando a força aplicada, escolhendo a amplitude de forças associada ao CSR pretendido e a frequência dos ciclos foi 1 Hz (um ciclo por segundo). Neste caso, observa-se a inversão das tensões principais, uma vez que a tensão de desvio varia entre valores positivos e negativos.

4- RESULTADOS

O objetivo dos ensaios de corte simples cíclico foi comparar os resultados em dois materiais distintos, com diferente conteúdo em finos. O Quadro 2 apresenta os ensaios realizados e inclui o índice de vazios após consolidação (e durante o corte uma vez que os ensaios foram realizados em condições não drenadas, isto é, sem variação de volume), o CSR e o número de ciclos em que o solo liquefez. O critério utilizado para

detetar o início de liquefação foi a pressão neutra aumentar até 100%, isto é $r_u = \Delta u / \sigma'_c = 1$. No caso dos ensaios de corte simples cíclico, o CSR é calculado dividindo a tensão média de corte cíclico pela tensão vertical efetiva inicial ($CSR_{ss} = \tau_{cyc} / \sigma'_{v0}$). Um exemplo dos resultados de um ensaio de corte simples cíclico, correspondente ao ensaio S1_M7_CSS2, encontra-se na Figura 3.

Quadro 2 - Ensaio de corte simples cíclico

Amostra	e_{corte}	CSR	N_{ciclos}
S1_M2_CSS1	0.65	0.22	2
S1_M2_CSS2	0.71	0.16	6
S1_M2_CSS3	0.63	0.09	36
S1_M7_CSS1	0.82	0.27	2
S1_M7_CSS2	0.81	0.16	13
S1_M7_CSS3	0.74	0.09	163

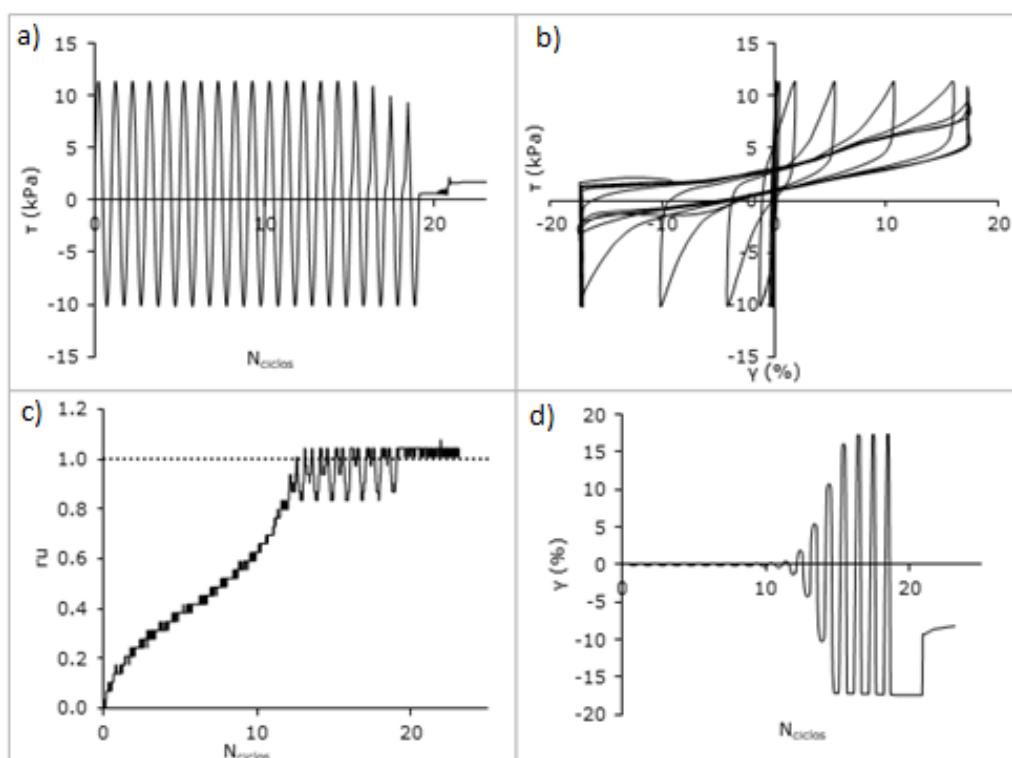


Figura 3 – Resultados de um ensaio de corte simples cíclico: a) tensão de corte vs. número de ciclos; b) tensão de corte vs. distorção; c) rácio de poro pressão vs. número de ciclos; d) distorção vs. número de ciclos

Na Figura 4 encontram-se as curvas de resistência cíclica obtidas para os dois materiais. O solo com maior conteúdo em finos (S1_M2) apresenta menor resistência à liquefação, uma vez que para o mesmo CSR o número de ciclos necessários para a ocorrência de liquefação é menor. Estes resultados corroboram as hipóteses propostas por alguns autores, de que a resistência cíclica dos solos depende do seu conteúdo em finos e diminui com o aumento deste, até um valor limite (Chang, 1990, Polito e Martin, 2001, Thevanayagam, 2007, Huang e Chuang, 2011).

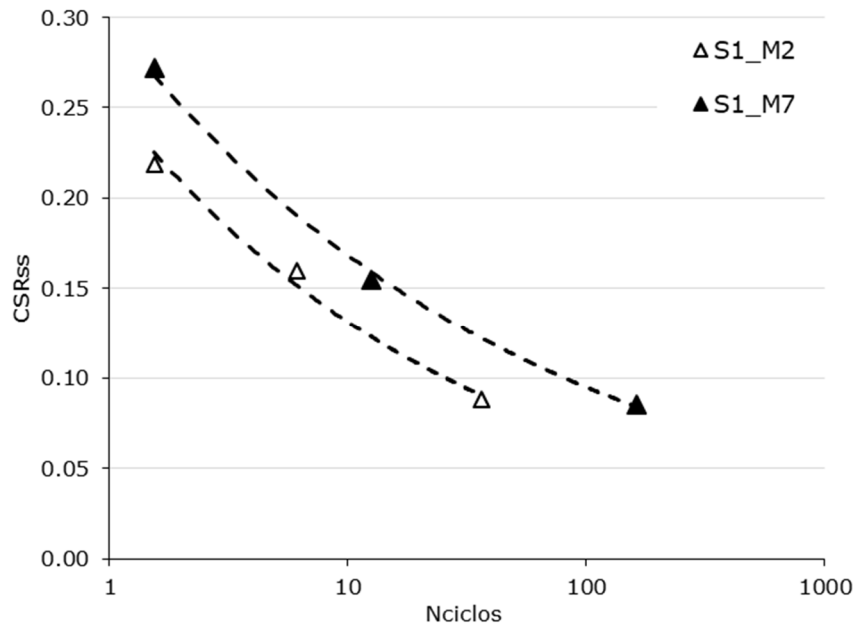


Figura 4 – Curvas de resistência cíclica obtidas nos ensaios de corte simples cíclico

Foram realizados ensaios triaxiais cíclicos em ambos os materiais, tentando simular as condições dos ensaios de corte direto simples, de modo a comparar os resultados obtidos pelos dois equipamentos. O Quadro 3 apresenta os ensaios triaxiais cíclicos realizados, bem como o índice de vazios durante o corte não drenado, o CSR e o número de ciclos em que se verificou ocorrência de liquefação. Foram realizados quatro ensaios em cada material. Os ensaios realizados com valores baixos de CSR (0.08) não atingiram a liquefação no número limite de ciclos impostos no *software* do sistema (1000 e 3000 ciclos no material S1_M7 e S1_M2, respetivamente). O critério de deteção de liquefação foi o mesmo que para os ensaios de corte simples cíclico, excesso de pressão neutra até 100%. O CSR é calculado dividindo a tensão de desvio cíclica por duas vezes a tensão efetiva média de confinamento ($CSR_{tx} = \sigma_{dc} / 2\sigma'_{2c}$).

Quadro 3 - Ensaios triaxiais cíclicos

Amostra	e_{corte}	CSR	N _{ciclos}
S1_M2_CT _x 1	0.72	0.184	43
S1_M2_CT _x 2	0.72	0.132	107
S1_M2_CT _x 3	0.69	0.075	-
S1_M2_CT _x 4	0.72	0.183	18
S1_M7_CT _x 1	0.81	0.144	336
S1_M7_CT _x 2	0.80	0.221	17
S1_M7_CT _x 3	0.78	0.078	-
S1_M7_CT _x 4	0.81	0.136	342

A Figura 5 mostra as curvas de resistência cíclica dos dois materiais obtidas nos ensaios triaxiais cíclicos. Mais uma vez, verifica-se que o solo com maior conteúdo de finos apresenta menor resistência à liquefação.

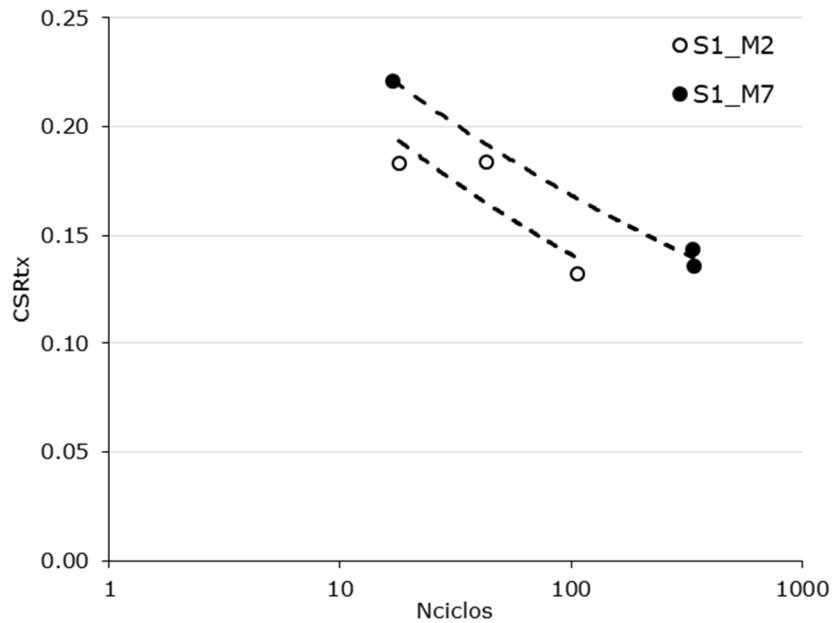


Figura 5 – Curvas de resistência cíclica obtidas nos ensaios triaxiais cíclicos

Uma vez que se obtiveram curvas nos dois tipos de ensaios para os dois materiais, é possível relacionar a resistência de cada material obtida por diferentes equipamentos de ensaio. Dividindo a equação correspondente à curva de resistência obtida nos ensaios de corte simples cíclico e nos ensaios triaxiais cíclicos, foram obtidas as equações 3 e 4 correspondentes aos materiais S1_M2 e S1_M7 respectivamente. Estas equações representam o parâmetro c_r , que relaciona o CSR dos ensaios de corte simples cíclico e o CSR dos ensaios triaxiais cíclicos.

$$\frac{CSR_{ss}}{CSR_{tx}} = 0.777 N_{ciclos}^{-0.105} \quad [3]$$

$$\frac{CSR_{ss}}{CSR_{tx}} = 0.874 N_{ciclos}^{-0.096} \quad [4]$$

Na Figura 6 apresentam-se as curvas definidas pelas equações 3 e 4. Os valores de c_r diminuem com o aumento do número de ciclos requeridos para ocorrência de liquefação. A curva correspondente ao material S1_M7 apresenta valores mais elevados do que a do material S1_M2, justificando mais uma vez que o material com maior percentagem de finos apresenta menor resistência. Interessante referir que as curvas aparentam ser quase paralelas.

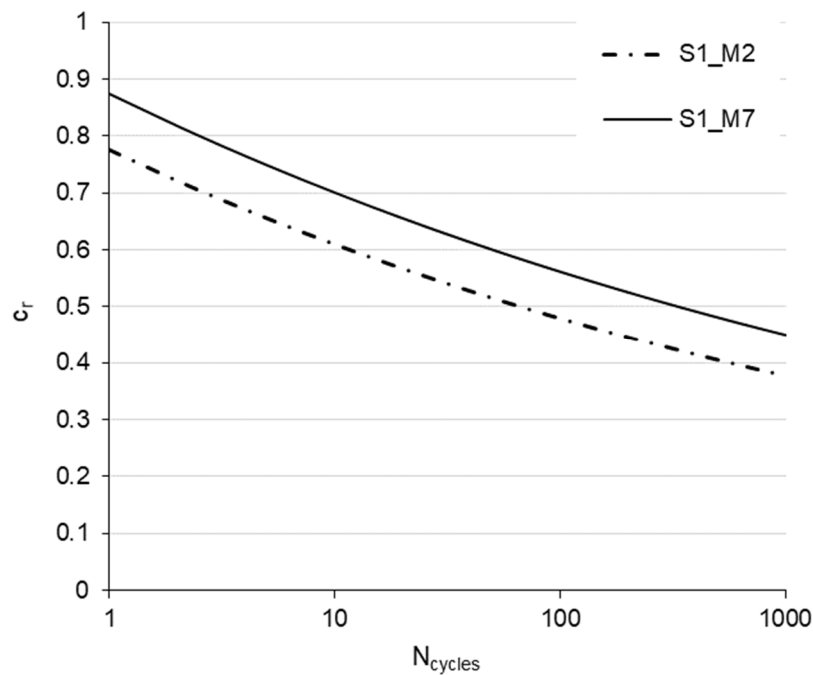


Figura 6 – Relação entre c_r e N_{ciclos}

De modo a estudar a influência da frequência dos ciclos de carregamento no número de ciclos requeridos para se observar liquefação, dois ensaios triaxiais cíclicos complementares foram realizados. A Figura 7 mostra os resultados obtidos para os dois materiais. Os ensaios no material S1_M2 foram realizados com CSR de 0.184 e índice de vazios 0.72 enquanto no material S1_M7 o CSR foi 0.144 e o índice de vazios 0.81. Conclui-se que, para o mesmo valor de CSR e condições iniciais, o número de ciclos necessário para ocorrer liquefação é menor quando a frequência de ciclos é menor, em conformidade com o obtido por Chang et al. (1982) e Rascol (2009). A relação entre o número de ciclos necessário para ocorrência de liquefação quando o ensaio é realizado com uma frequência de 0.1 Hz e quando a frequência é 1Hz é de 0.79 no material S1_M2 e de 0.85 no S1_M7. Mais ensaios serão realizados para solidificar estas conclusões e confirmar a tendência.

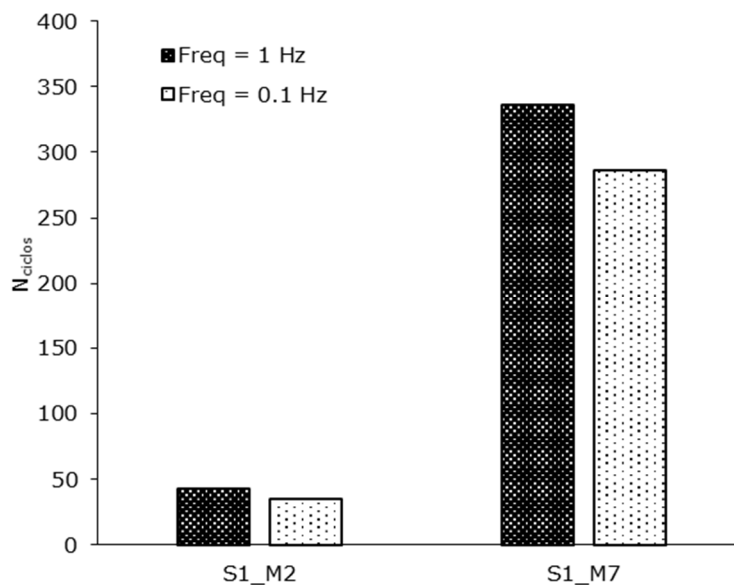


Figura 7 – Influência da frequência dos ciclos no número de ciclos necessários para ocorrer liquefação

5- CONCLUSÕES

Este trabalho enquadra-se no âmbito de estudos que estão a ser conduzidos em solos granulares provenientes de Portugal continental, mais concretamente da região de Lisboa, para avaliar a sua suscetibilidade à liquefação induzida por carregamentos cíclicos e o seu comportamento no caso de ocorrência de um sismo. O trabalho comporta a realização de ensaios de corte simples cíclico e de ensaios

triaxiais cíclicos com o objetivo de comparar os resultados obtidos nos dois tipos de ensaio e em dois solos com conteúdo em finos diferente. Também a influência da frequência dos ciclos na resistência à liquefação é levemente abordada. Baseado nos resultados obtidos, as principais conclusões deste estudo podem ser divididas em diferentes tópicos:

Influência do conteúdo de finos: No caso das percentagens de finos estudadas (9% e 2%), o material com a maior percentagem de finos demonstrou a menor resistência à liquefação, como descrito em vários trabalhos de outros autores.

Relação entre curvas de resistência obtidas em ensaios cíclicos de corte simples e triaxiais: A relação entre CSR_{ss} e CSR_{tx} foi obtida e evolui de acordo com o número de ciclos requeridos para ocorrência de liquefação. O valor de c_r diminui com o aumento do número de ciclos.

Influência da frequência dos ciclos: A frequência dos ciclos também influencia a resistência à liquefação. As frequências utilizadas foram 1Hz e 0.1Hz. Verificou-se que, no caso dos materiais estudados e para ensaios triaxiais cíclicos, as amostras cujo corte foi realizado com menor frequência de ciclos (0.1Hz) liquefizeram em menor número de ciclos, pelo que se conclui que a resistência é menor quando o corte é realizado mais lentamente (com menor frequência de ciclos).

No entanto, mais ensaios são necessários e estão a ser realizados para confirmar as tendências obtidas e a influência do conteúdo em finos, densidade relativa e condições cíclicas na resistência dos solos à liquefação.

AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer ao projeto de investigação Europeu H2020 LIQUEFACT (www.liquefact.eu), ao projeto nacional PTDC/ECM-GEO/1780/2014 (LIQ2PROEARTH) e à bolsa de doutoramento SFRH/BD/120035/2016 atribuída pela FCT, que financiaram este trabalho. A primeira autora quer agradecer ao Professor Janko Logar por possibilitar a realização dos ensaios de corte simples no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil e Geodética na Universidade de Ljubljana.



LIQUEFACT project ("Assessment and mitigation of liquefaction potential across Europe: a holistic approach to protect structures / infrastructures for improved resilience to earthquake-induced liquefaction disasters") has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No GAP-700748.

REFERÊNCIAS

- Castro, G. (1975) - Liquefaction and cyclic mobility of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, No. GT6, pp. 551-569.
- Chang, N.Y., Hsieh, N.P., Samuelson D.L., e Horita M. (1982) - Effect of Frequency on Liquefaction Potential of Saturated Monterey No. O Sand. *Computational Methods and Experimental Measurements*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 433-446.
- Chang, N.Y. (1990) - Influence of Fines Content and Plasticity on Earthquake-induced Soil Liquefaction. *Contract No. DACW3988-C-0078*, US Army WES, MS.
- Dash, H.K. e Sitharam, T.G. (2016) - Effect of frequency of cyclic loading on liquefaction and dynamic properties of saturated sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 10(5), pp. 487-492.
- Finn, W.D.L., Pickering, D.J., e Bransby, P.L. (1971) - Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM4, pp. 639-659.
- Huang, A.B. e Chuang, S.Y. (2011) - Correlating Cyclic Strength with fines contents through state parameters. *Soils and Foundations*, vol. 51(6), pp. 991-1001.
- Ishihara, K., e Yasuda, S. (1975) - Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation. *Soils and Foundations*, vol. 15(1), pp. 45-59.
- Kokusho, T. (2017) - *Innovative Earthquake Soil Dynamics*. CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group, London, UK.
- Kramer, S. L. (1996) - *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle. New Jersey, USA, pp. 653.

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM, 2016) - State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. Washington, DC: The National Academies Press. Doi: 1017226/23474.
- Polito, C.P. e Martin II, J.R. (2001) - Effects of Nonplastic Fines on the Liquefaction Resistance of Sands. *J. Geotech. And Geoenv. Eng. Div., ASCE*, vol. 127(5), pp. 408-415.
- Rascol, E. (2009) - Cyclic Properties of Sand: Dynamic Behaviour for Seismic Applications. PhD Thesis, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland*.
- Seed, H. B. e Lee, K.L. (1966) - Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *J. of Soil Mech. and Foundation Div., ASCE*, vol. 92(6), pp. 105-134.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1971) - Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, vol. 97(9), pp. 1249-1273.
- Seed, H.B. e Peacock, W.H. (1971) - Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics. *Journal of SMFD, ASCE*, vol. 97(8), pp. 1099-1119.
- Thevanayagam, S. (2007) - Intergrain contact density indices for granular mixes- II: liquefaction resistance. *J. Earthq. Eng. Eng. Vib.*, vol. 6(2), pp. 135-146.
- Thevanayagam, S., Veluchamy, V., Huang, Q. e Sivaratnarajah, U. (2016) - Non-plastic silty sand liquefaction, screening, and remediation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 91, pp. 147-159.
- Tsuchida, H. (1970) - Prediction and countermeasure against liquefaction in sand deposits. *Seminar in the Port and Harbor Research Institute*, vol. 3, pp. 3.1-3.33.
- Viana da Fonseca, A., Rios, S., Amaral, M. e Panico, F. (2013) - Fatigue cyclic tests on artificially cemented soil. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 36(2), pp. 227-235.
- Viana da Fonseca, A., e Pineda, J. (2017) - Getting high-quality samples in 'sensitive' soils for advanced laboratory tests. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 2:34, Springer International Publishing.
- Whitman, R.V. (1971) - Resistance of soil to liquefaction and settlement. *Soils and Foundations*, vol. 11(4), pp. 59-68.