

SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO DE UMA AREIA DUNAR AVALIADA EM ENSAIOS LABORATORIAIS COM MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DE ONDAS SÍSMICAS

Liquefaction susceptibility of a dune sand assessed by laboratory tests with measurement of seismic wave velocities

José Rocha*

António Viana da Fonseca**

RESUMO – Neste trabalho avaliou-se a susceptibilidade à liquefacção de uma areia dunar proveniente de Ain Beniam, em Argel, Argélia, onde, em 2003, ocorreu o sismo Boumerdès que causou graves danos a nível estrutural, muitos deles associados a este fenómeno.

Estes estudos têm vindo a ser efectuado no LabGeo da FEUP, incorporando ensaios de compressão isotrópica e edométrica, assim como ensaios triaxiais cíclicos, não drenados, tendo-se utilizado transdutores piezoelétricos, do tipo *bender-extender elements*, que permitiram a medição de ondas de compressão (“P”) e distorcionais ou de corte (“S”). O conjunto de amostras ensaiadas foi preparado com recurso à técnica de apiloamento com solo húmido (“moist tamping”), para um determinado valor do teor em água, mas com variações do índice de vazios, de forma a ser possível definir quais as condições de compacidade limite para a ocorrência do fenómeno em estudo.

Desta forma foi possível avaliar a susceptibilidade à liquefacção estática e cíclica, para diferentes condições de estado, utilizando diferentes critérios, tal como o da composição física do material, o da condição de estado pela teoria dos estados críticos, e correlacionando a acção com a resistência em acções cíclicas por via da velocidade normalizada das ondas distorcionais sísmicas.

SYNOPSIS – This work presents the assessment of the liquefaction susceptibility of a dune sand from Ain Beniam in Alger, Algeria, where, in 2003, the Boumerdès earthquake occurred, causing serious damage to several infrastructures, some of them related to this phenomenon.

Theses studies have been carried out in LabGeo from FEUP, incorporating isotropic compression tests and oedometer tests, as well as undrained cyclic triaxial tests, complementarily recurring to piezoelectric transducers, of bender-extender element type, which allowed the measurement of the velocities of seismic compression (P) and distortion or shear (S) waves. All specimens were prepared using the moist tamping technique for the same moisture content, varying the void ratio to define which are the limit conditions of density, for which this phenomenon is expected to occur.

By this mean it was possible to evaluate the susceptibility to flow liquefaction and cyclic mobility for different state conditions, using different criteria such as material physical compositions, state condition in relation of critical state theory and correlations with the cyclic resistance taking reference to S wave velocities.

PALAVRAS CHAVE – Liquefacção, ensaios triaxiais estáticos e cíclicos, ondas sísmicas.

* Engenheiro Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. E-mail: ec04203@fe.up.pt

** Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. E-mail: viana@fe.up.pt

1 – INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

A liquefacção é um dos mais complexos e controversos assuntos da engenharia geotécnica e sísmica. Por essa razão os estudos neste campo aumentaram consideravelmente nos últimos 40 anos, em grande parte devido aos sismos que ocorreram em 1964 no Alasca e em Niigata e os subsequentes. Ao longo dos anos, o termo liquefacção passou a ser relacionado com um fenómeno que consiste na perda de resistência e/ou rigidez de um solo, saturado e em condições não drenadas, de carregamento monotónico ou cíclico, ou seja, num curto intervalo de tempo, podendo levar à rotura brusca do mesmo (colapso). Durante o processo, vão-se gerando excessos positivos de pressão na água dos poros do solo que poderão igualar o valor da tensão total, resultando daí a anulação das forças interparticulares ou tensões efectivas.

Uma vez que, a resistência ao corte do solo é uma função directa das tensões efectivas, ou seja, das forças interparticulares, no momento que estas se anulam ocorrem assentamentos e, em muitos casos, aberturas de fendas na superfície do terreno com expulsão de água sob pressão (o fenómeno de “bolha de areia”), que são devastadoras para as estruturas fundadas no mesmo.

Foram realizados ensaios triaxiais estáticos em amostras com um índice de vazios de 0,9 e um teor em água de 5% (condições utilizadas em trabalhos precedentes, Fonseca, 2009 e Pinheiro, 2009), de forma a obter uma melhor caracterização da linha dos estados críticos do material em estudo. Para valores de índice de vazios mais baixos, foi confirmado que não é expectável a ocorrência do fenómeno de liquefacção estática. Como ferramenta auxiliar aos ensaios estáticos, para definir a linha de consolidação em condições confinadas, tecnicamente paralela à linha dos estados críticos, realizaram-se dois ensaios edométricos até grandes tensões. Da mesma forma, para avaliar a mobilidade cíclica, e como ferramenta mais adaptada à acção em causa, foram realizados ensaios cíclicos, tendo-se também adoptado um teor em água de 5%, mas fazendo-se variar o índice de vazios entre 0,9 (condição já estudada, que apresenta uma clara susceptibilidade ao fenómeno da liquefacção) e 0,8, de forma a definir as condições limite de compacidade para a ocorrência do fenómeno em carregamentos cíclicos. O nível de acção imposto nestes ensaios teve por base o espectro sísmico correspondente ao sismo de Boumerdès, enquanto que a frequência da oscilação sinusoidal adoptada foi de 1Hz, de forma a ser possível obter um melhor registo das grandezas envolvidas, tendo em conta os equipamentos disponíveis.

A existência de transdutores piezoeléctricos nas câmaras triaxiais do Laboratório de Geotecnia da FEUP (www.labgeo.fe.up.pt), permitiram a avaliação das propriedades dinâmicas, associadas às velocidades das ondas sísmicas de compressão, P, e distorcionais, S.

O principal objectivo deste trabalho passa então pela avaliação dos parâmetros de estado e da acção cíclica que potenciam o fenómeno da liquefacção nas areias dunares de Ain Beniam.

2 – EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados 26 ensaios triaxiais, quer estáticos quer cíclicos, por serem dos mais completos, mas simples, e adequados, desde que assumidas algumas simplificações (Kramer, 1996, Jefferies e Been, 2006), à caracterização da resistência ao fenómeno de liquefacção monotónica e cíclica de um solo. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da FEUP e a descrição pormenorizada dos equipamentos pode ser encontrada em Rocha (2010). Tal como já foi referido, estes ensaios foram munidos de transdutores do tipo *bender/extender elements* que permitiram o registo dos tempos de chegada das ondas P e S (mais detalhes em Viana da Fonseca e Ferreira, 2002).

Para a realização dos ensaios triaxiais, dependendo do tipo de carregamento aplicado, é essencial uma preparação adequada do provete. Foi adoptada a técnica de apiloamento suave de solo um pouco húmido, *moist tamping*, que é uma técnica reconhecida como particularmente eficiente e

comummente usada na moldagem de provetes de solos arenosos e siltosos, permitindo obter amostras de baixa compacidade, ou seja, para índices de vazios elevados, como o desta areia nas condições *in situ*.

Neste trabalho, a preparação e montagem dos provetes consistiu nas seguintes etapas:

1. Começam por se realizar marcas de orientação na membrana, que facilitam a colocação da instrumentação interna nos ensaios estáticos e servem de guias para posterior introdução do material.
2. É colocado um filtro na base da câmara, de forma a evitar a passagem de finos através da pedra porosa. Este filtro é previamente cortado com a forma do *bender/extender element* de forma a não obstruir o contacto entre o transdutor e o solo.
3. A membrana é presa à base da câmara através da aplicação de 2 *o-rings*, que impedem a entrada de água pela base do provete.
4. Um molde metálico e cilíndrico é colocado sobre a placa da base, ajustando-se posteriormente a membrana de forma a ser possível uma correcta moldagem do solo. É aplicada uma pressão de vácuo da ordem dos 50 kPa entre o molde e a membrana, para que esta fique perfeitamente esticada e encostada ao molde. Por fim são retiradas as medidas do interior do molde.
5. Conhecidas as medidas do molde, calcula-se a quantidade de material tendo em conta o índice de vazios desejado e o teor em água correspondente, que no presente trabalho foi sempre de 5%.
6. A quantidade de solo necessária é então dividida em 5 partes para a sua colocação por camadas. Esta opção permite moldar o provete por etapas, evitando assim erros grosseiros de compacidade no final da montagem.
7. No final da colocação do solo, coloca-se o topo, alinhando o par de *bender/extender elements* (emissor e receptor). A membrana é ajustada ao topo com a utilização de 2 *o-rings*.
8. De forma a ser retirado o molde metálico, altera-se a aplicação de pressão negativa (do vácuo) passando esta a exercer-se pela base do provete com um valor entre 10 kPa e 15 kPa. Por fim são medidas as dimensões finais do provete de forma a determinar o valor real do índice de vazios.
9. Finalmente, é introduzida a câmara que, após ser devidamente fechada, se enche com água. Substitui-se gradualmente a pressão interna por uma tensão de confinamento, geralmente, entre 10kPa e 15kPa. O provete fica assim pronto para o início das fases de ensaio triaxial.

Para além da fase de preparação em cima descrita, a execução dos ensaios envolveu as seguintes etapas: (i) percolação dos provetes com água destilada, de forma a expulsar as bolhas de ar mais significativas do interior da amostra (assegurou-se sempre que o volume de água percolado fosse no mínimo o dobro do volume de vazios); (ii) saturação plena da amostra, por aumento da contra-pressão até à remoção completa da fase gasosa, sendo tal conseguido através da introdução de elevadas pressões que induzem a sua dissolução; (iii) consolidação, isotrópica para os ensaios estáticos e anisotrópica para os ensaios cíclicos, que permite a simulação das condições desejadas antes da fase de corte (note-se que em outra fase deste estudo seriam conduzidos ensaios monotónicos após consolidação anisotrópica, mas que não serão aqui incluídos); (iv) corte estático e cíclico, em condições não drenadas, consistindo no carregamento vertical da amostra monotónica e ciclicamente, respectivamente, e consoante o tipo de análise desejada, e, ainda, um ensaio de corte monotónico em condições drenadas (este complementaria os estudos anteriores, com ensaios drenados, Ghili, 2003, Pinheiro, 2009 e Fonseca, 2009).



Fig. 1 – Fases de montagem: a) ajuste da membrana ao molde; b) introdução de uma camada de areia; c) fase final da colocação da areia no molde.

3 – RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados treze ensaios estáticos e treze ensaios cíclicos, como é possível constatar no Quadro 1, mantendo constante o teor em água mas fazendo variar a compacidade e o estado de tensão das amostras.

Quadro 1 – Condições de estado e tensões de repouso dos ensaios não drenados, monotônicos e cíclicos.

	w (%)	e	σ'_h (kPa)	K	σ'_v (kPa)	Condição de ensaio
LD40	5	0,9	15	1	15	Estático
LD41	5	0,9	15	1	15	Estático
LD42	5	0,9	15	1	15	Estático
LD43	5	0,9	25	0,5	50	Estático
LD44	5	0,9	30	1	30	Estático
LD45	5	0,9	100	1	100	Estático
LD46	5	0,9	400	1	400	Estático
LDC47	5	0,9	50	0,5	100	Cíclico
LD48	5	0,9	1000	1	1000	Estático
LDC49	5	0,9	100	0,5	200	Cíclico
LDC50	5	0,9	100	0,5	200	Cíclico
LDC51	5	0,9	200	1	200	Cíclico
LDC52	5	0,9	50	1	50	Cíclico
LDC53	5	0,9	15	1	15	Cíclico
LDC54	5	0,8	100	0,5	200	Cíclico
LDC55	5	0,8	25	0,5	50	Cíclico
LDC56	5	0,85	100	0,5	200	Cíclico
LDC57	5	0,85	25	0,5	50	Cíclico
LDC58	5	0,85	25	0,5	50	Cíclico
LDC59	5	0,85	25	0,5	50	Cíclico
LDC60	5	0,85	15	0,5	30	Cíclico
LD61	5	0,9	1000	1	1000	Estático
LD62	5	0,85	15	1	15	Estático
LD63	5	0,9	500	1	500	Estático
LD64	5	0,9	1000	1	1000	Estático
LD65	5	0,9	15	1	15	Estático

Para a avaliação do coeficiente de impulso, tal como já havia sido adoptado em trabalhos precedentes, recorreu-se à proposta de Jaky (1944) que, para solos puramente friccionais, depende exclusivamente do ângulo de atrito, ϕ° , conforme indica a expressão (1).

$$k_0 = 1 - \sin \phi^\circ \quad (1)$$

Através dos resultados dos ensaios de corte directo realizados, determinou-se um valor do ângulo de atrito de $32,4^\circ$, que dá origem a um coeficiente de impulso de 0,464, valor bastante próximo do que havia sido anteriormente determinado por Ghili (2003) e Fonseca (2009).

Os ensaios triaxiais estáticos permitiram, juntamente com os resultados dos ensaios edométricos, definir as linhas de consolidação em condições, isotrópicas e de confinamento pleno (vulgo unidimensional) - designado por LNCISO e LNCEDO, respectivamente – bem como a linha dos estados críticos do material em estudo, para além da evolução do módulo dinâmico com a tensão efectiva média de confinamento. Importa salientar que estas linhas são teoricamente paralelas, o que se verificou razoavelmente pelos resultados configurados na representação dos pontos da Figura 2.

Com os ensaios triaxiais cíclicos foi possível estabelecer a relação entre o parâmetro de estado, ψ , e a acção cíclica expressa pelo valor da razão de carregamento cíclico adaptado para as condições triaxiais, CSRTX (Kramer, 1996).

4 – ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO

4.1 – Ensaio triaxiais monotónicos ou estáticos

Dos treze ensaios triaxiais monotónicos ou estáticos, oito possibilitaram a determinação da linha normalmente consolidada em condições isotrópicas (LNCISO) e da linha dos estados críticos (LEC). A estes resultados adicionaram-se três outros, de ensaios realizados por Pinheiro (2009), que possibilitaram uma melhor definição das referidas curvas. No Quadro 2, apresentam-se algumas características destes ensaios.

Quadro 2 – Características dos ensaios que definem a LNC e a LEC.

	w(%)	$V_0(\text{cm}^3)$	e_0^*	K_0	Cons. (kPa)	e_c	Condição
LD42	5	522,82	0,907	1	15	0,8998	Não Drenado
LD44	5	529,56	0,919	1	30	0,8949	Não Drenado
LD45	5	508,98	0,906	1	100	0,8809	Não Drenado
LD46	5	527,17	0,880	1	400	0,8491	Não Drenado
LD48	5	532,40	0,906	1	1000	0,8401	Não Drenado
LD63	5	522,98	0,921	1	500	0,8129	Drenado
LD64	5	518,25	0,910	1	1000	–	Drenado
LD65	5	513,03	0,901	1	15	0,8850	Drenado

* optou-se por deixar expresso o valor de e_0 com três casas decimais dada a sensibilidade do índice de vazios na análise de estado, embora se reconheça que na prática corrente toma-se só 2 casas decimais.

Uma vez que, com os ensaios triaxiais apenas era possível a obtenção de resultados para valores de consolidação máximos, da ordem dos 1000 kPa, recorreu-se aos resultados dos ensaios edométricos para definir a linha dos estados críticos para tensões mais elevadas, admitindo o seu paralelismo. Trata-se, porém, de uma mera suposição que se deve confirmar no futuro. Na Figura 2 estão representados os resultados dos ensaios bem como a definição da LNC e da LEC.

Como antes se referiu, é visível um claro paralelismo entre a linha dos estados críticos, LEC, e a linha normalmente consolidada, LNC, o que é expectável à luz dos conceitos da Teoria dos Estados Críticos. Porém, em termos de carregamento não-drenado, tal só é verificado para tensões superiores a 100 kPa porque os pontos representados são os correspondentes a ensaios sem drenagem que liquefizeram. De facto, para valores baixos de tensões efectivas, as amostras apresentam susceptibilidade à liquefacção, desenvolvendo uma trajectória de tensões efectivas, convergindo para a sua anulação e um total colapso na representação “índice de vazios” vs tensão média efectiva (caso amostras LD42, LD44 e LD45).

Nos ensaios LD46, LD48 e LD4, não drenados, não ocorreu liquefacção, tendo sido utilizados os seus resultados para traçar a linha dos estados críticos, LEC. De forma a definir melhor esta linha, realizaram-se três ensaios drenados, LD63, LD64 e LD65. No ensaio, LD64, foi, no entanto, necessário impor uma condição não drenada durante a fase de corte drenado (por razões logísticas), ficando aquém da LEC. O ensaio LD65 permitiu confirmar o prolongamento da trajectória da Linha dos Estados Críticos, correspondente à zona estável, para baixas tensões.

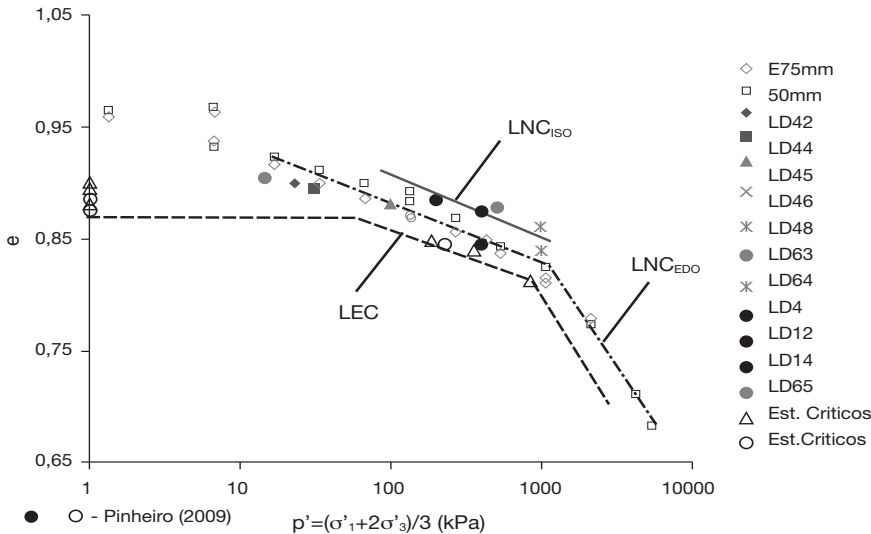


Fig. 2 – Definição das linhas normalmente consolidadas, isotrópica e edométrica, e dos estados críticos.

Assim sendo, a linha dos estados críticos pode ser dividida em três zonas: até aos 100 kPa, existe uma zona com grande susceptibilidade à liquefacção, que designamos por “zona metaestável”; entre 100 kPa, e até aproximadamente 1000 kPa, a linha dos estados críticos (LEC) é paralela à linha LNC, designada por “zona estável”; e, a partir dos 1000 kPa, estas linhas terão uma maior inclinação, tendo sido extrapoladas dos ensaios edométricos e justificadas pela quebra de grãos, com conseqüente aumento da percentagem de finos (semelhantemente a outros materiais estudados recentemente no LabGeo da FEUP – Bedin, 2010).

4.2 – Ensaios triaxiais cíclicos

4.2.1 – Avaliação da susceptibilidade à liquefacção cíclica à luz das cartas de liquefacção (CSR vs CRR_{VS})

A acção sísmica pode ser expressa, segundo o método simplificado proposto por Seed e Idriss (1971), pela razão das tensões cíclicas, que se baseia na aceleração máxima na superfície do terreno, nos termos que se exprimem na Razão de Acção Cíclica (CSR_{in situ}), materializada em:

$$CSR_{in situ} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 \times \alpha \times r_d \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad (2)$$

em que:

- τ_{av} – é a tensão média de corte ;
- σ'_{vo} – é a tensão efectiva vertical;
- α – é a razão entre a aceleração máxima do terreno, $a_{m\acute{a}x}$, e a aceleração da gravidade, g , indicadas na expressão:

$$\alpha = \frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \quad (3)$$

- r_d – é um factor que tem em conta a flexibilidade do solo em profundidade.

A acção cíclica em condições de laboratório, é expressa pela razão das tensões cíclicas CSR_{TX} , é determinada pela expressão:

$$CSR_{TX} = \frac{\tau_d}{\sigma'} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_m} \quad (4)$$

em que:

- CSR_{TX} – é a razão de tensões cíclicas para ensaios triaxiais;
- τ_d – é a tensão de corte num ciclo;
- σ'_m – é a tensão efectiva média de confinamento;
- σ_d – é a tensão de desvio cíclica, corresponde à gama de tensão vertical cíclica em ensaios correntes (apenas com acção axial ou vertical) e, neste caso, imposta por um carregamento com a frequência de 1Hz.

Todos estes procedimentos foram controlados através de um equipamento e software desenvolvido na FEUP. Os procedimentos foram definidos em função do valor de consolidação de cada ensaio, sendo feita uma solicitação linear, à taxa de 20 N/min, de forma a atingir a carga vertical necessária para obter as condições de consolidação desejadas, ou seja, $K_0=0,5$, seguindo-se um patamar com a duração de 5 minutos, em que não há alteração do valor da carga vertical aplicada, seguindo uma solicitação sinusoidal, ao qual está associado o início dos ciclos de carga com a amplitude definida e frequência desejada.

A susceptibilidade a um fenómeno de rotura como é a liquefacção, é atida pela avaliação do equilíbrio limite entre aquela acção cíclica com a resistência à mesma, que pode também ser expressa por uma Razão de Resistência Cíclica, CRR (Cyclic Resistance Ratio). Esta tem distintas expressões de dependência com parâmetros derivados de ensaios geotécnicos. Uma das mais recentes foi proposta por Andrus e Stokoe (2000), função das velocidades de ondas sísmicas distortionais ou de corte (V_s). Aplicada a solos não cimentados holocénicos, com menos de 5% de finos, resultaram de dados obtidos a partir de 20 sismos diferentes e mais de 50 locais de medição, tendo sido obtida a expressão (Youd *et al.*, 2001):

$$CRR = a \left(\frac{V_{SI}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{SI}^* - V_{SI}} - \frac{1}{V_{SI}^*} \right) \quad (5)$$

em que: a e b são constantes; V_{SI} e V_{SI}^* são, respectivamente, o valor da velocidade das ondas de corte normalizada do registo local e o limite superior da mesma para a ocorrência de liquefacção, sendo a normalização expressa por:

$$V_{SI} = V_S \times \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,25} = V_S \times \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right)^{0,25} \times \left(\frac{P_a}{\sigma'_m} \right)^{0,25} \quad (6)$$

Em que:

- V_{SI} – é a velocidade das ondas de corte normalizada;
- V_S – é a velocidade das ondas de corte;
- P_a – é a pressão atmosférica (aproximadamente igual a 100kPa);
- σ'_{vo} – é a tensão efectiva vertical inicial (admitindo um $K_0=0,5$).

O ábaco que relaciona as razões de acção e resistência viria a ter a sua expressão mais estabilizada em ábaco de Andrus e Stokoe (2000) e na formulação de Youd *et al.* (2001). Como a resistência à liquefacção em condições laboratoriais é superior, em cerca de 10%, face às condições de campo, é necessário dividir a expressão (2) por 0,9, de forma a determinar os valores realistas de CRR, correspondentes às condições em que foram executados os ensaios, passando este a ser denominado por CRR_{TX} (Kramer, 1996; Jeffries e Been, 2006). Na Figura 3 representa-se o ábaco limite desenvolvido para condições de laboratório.

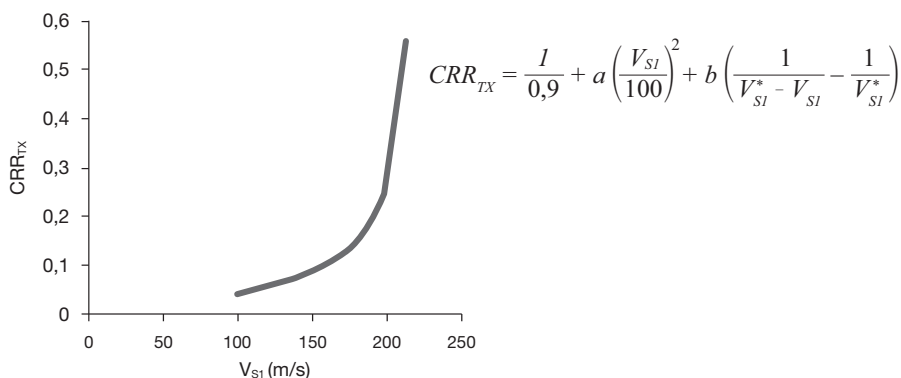


Fig. 3 – Relação entre V_{SI} e CRR, adaptado para ensaios triaxiais (adaptado de Andrus e Stokoe, 2000, e Youd *et al.*, 2001).

Sobre o ábaco da Figura 3 foram colocadas na Figura 5 as marcas correspondentes às velocidades das ondas sísmicas, de corte ou distorcionais, normalizadas e no estado de tensão de repouso prévio ao carregamento cíclico, bem como alguns resultados de trabalhos anteriores, LDC24, 26 e 28, Fonseca (2009).

Estes valores da acção começaram por ser referenciados aos registos feitos aquando do terramoto de 2003. Assim, o parâmetro α foi ponderado a partir do espectro do sismo de Boumerdès (Figura 4). Como os espectros sísmicos são muito variáveis, no curto espaço de tempo em que ocorre o sismo, foi necessário adoptar um valor médio que permite determinar a força a utilizar no ensaio.

Constata-se que os ensaios que foram moldados com um índice de vazios inferior a 0,9, nomeadamente os ensaios LDC54 e LDC55, são os que apresentam valores maiores da velocidade normalizada das ondas S, V_{SI} , o que seria de esperar, mas também correspondem a valores de CSR_{TX} mais elevados.

O ensaio LDC56, apesar de apresentar uma menor compacidade, comparativamente com os ensaios referidos anteriormente, para uma consolidação de 100 kPa (tensão efectiva horizontal), encontra-se do lado direito da curva, isto é, a região que define os estados em que não há suscepti-

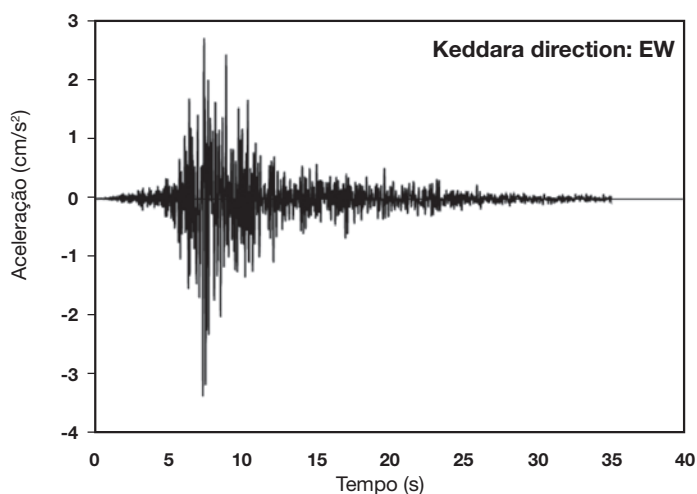


Fig. 4 – Espectro sísmico registado em Keddara (Ghili, 2003).

Quadro 1 – Valores de CSR_{TX} e V_{SI} para os estados de tensão prévios ao carregamento cíclico.

	σ'_d (kPa)	σ'_{h0} (kPa)	σ'_{v0} (kPa)	p' (kPa)	CSR_{TX}	V_s (m/s)	K_0	V_{SI} (m/s)	N Ciclos
LDC49	55	94	210	133	0,206	180,76	0,45	150,18	7
LDC50	43	96	194	128	0,167	173,79	0,49	147,22	2
LDC54	68	98	200	132	0,257	272,90	0,49	229,42	∞
LDC55	18	23	73	40	0,229	205,07	0,31	221,98	∞
LDC56	52	98	198	131	0,199	250,76	0,49	211,40	35
LDC59	10	22	52	32	0,164	152,56	0,43	180,03	12
LDC60	3	15	35	21	0,061	127,74	0,42	166,08	40
LDC24	36	50	99	66	0,268	161,11	0,51	161,47	1
LDC26	15	48	98	65	0,118	166,16	0,49	167,05	10
LDC28	25	99	199	132	0,094	182,53	0,50	153,70	6

bilidade à liquefacção, nos termos identificados pelos autores em registos de sismos reais. Na verdade ocorreu liquefacção, mas para um número de ciclos superior a 15 ciclos, que se assume correntemente como fronteira entre os dois estados, à luz da percepção de que a maior parte das incidências sísmicas mais significativas (os abalos primários e excluindo as réplicas) têm durações com acelerações de cálculo, partindo da análise espectral, não superiores a 15 segundos. Note-se que estes dados foram elaborados para sismos de referência com uma magnitude de 7,5 na escala de Richter.

Os restantes ensaios encontram-se todos do lado esquerdo da curva, com exceção do ensaio LDC60 que, ao contrário do que seria de esperar, se encontra no lado oposto. A justificação para este resultado, prende-se com o facto de a tensão média, σ'_m , ser muito baixa, decorrendo uma muito baixa amplitude de carga realmente aplicada no provete, que origina um valor de CSR_{TX} muito baixo. Relacionando o número de ciclos necessários para a ocorrência de liquefacção (apresentado no Quadro 3), com a razão das tensões cíclicas, CSR_{TX} , os resultados organizam-se como na Figura 6.

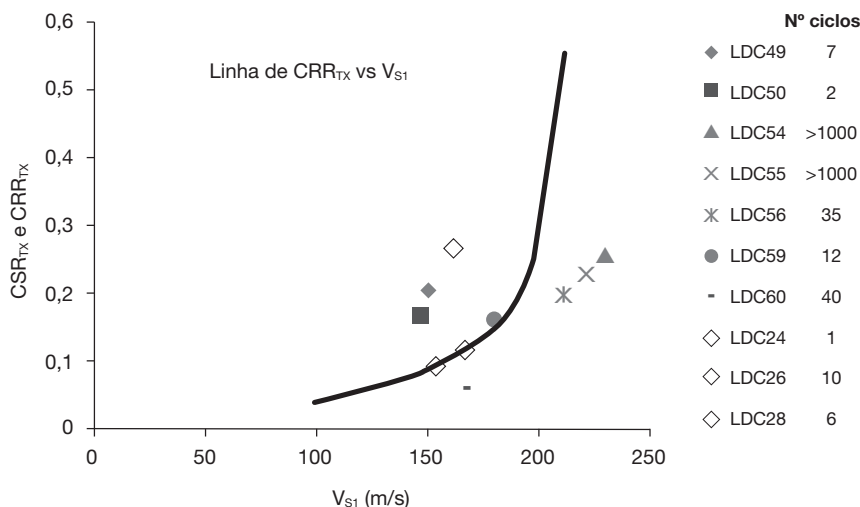


Fig. 5 – Avaliação da susceptibilidade à liquefacção nos ensaios cíclicos, à luz dos registos dos pares de valores “razão de acção cíclica” e “velocidade de ondas de corte normalizada em estado de repouso”.

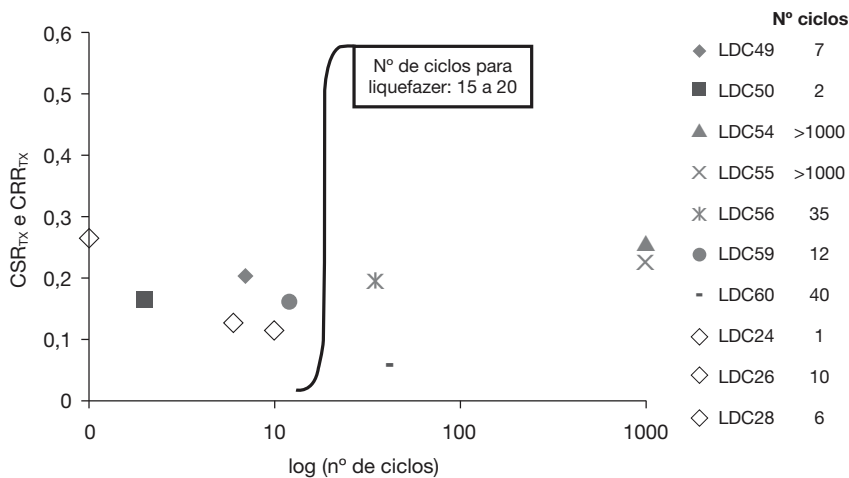


Fig. 6 – Relação entre o número de ciclos e o valor de $CSRTX$ e o seu posicionamento em relação a uma linha de fronteira para 15 ciclos, até ao colapso por liquefacção.

Comparando os resultados apresentados na Figura 5 com os da Figura 6, conclui-se que os ensaios LDC56 e LDC60, que liquefizeram e se encontram do lado direito da curva, necessitaram de um número de ciclos superior aos valores tidos como realistas, inferior ou igual a 15. Todos os ensaios que se encontram na região susceptível à liquefacção (lado esquerdo da curva) necessitaram de um número de ciclos inferior aos valores limite.

4.2.2 – Avaliação da susceptibilidade cíclica com base no parâmetro de estado

Foi também realizada uma avaliação da susceptibilidade à liquefacção nos ensaios cíclicos a partir do ábaco de liquefacção com base no parâmetro de estado, proposto pela escola de Berkeley, adaptado por Youd *et al.* (2001) e referido por Jefferies e Been (2006) – Figura 7.

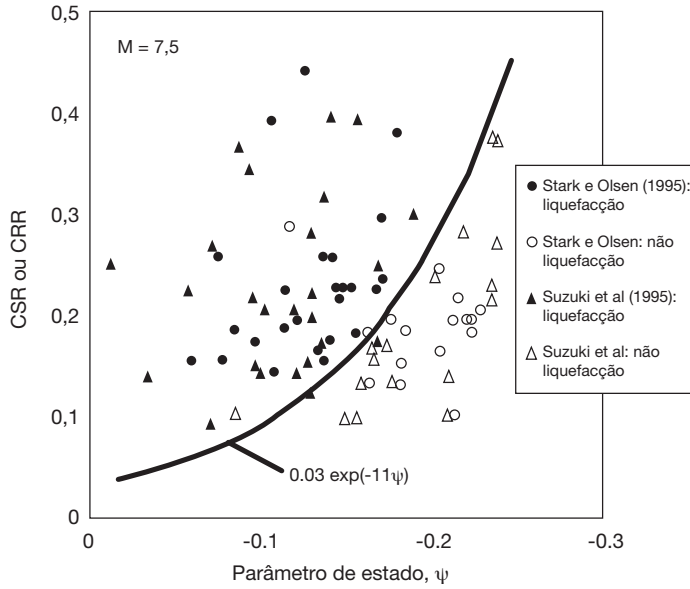


Fig. 7 – Relação entre o parâmetro de estado, ψ , e CSR (pontos) ou CRR (linha de fronteira) (Jefferies e Been, 2006).

Uma vez que existe uma equivalência entre a resistência de penetração normalizada, Q (Robertson, 2004), e os resultados normalizados dos ensaios SPT, $(N_1)_{60}$, e que esta resistência é função do parâmetro de estado do terreno, ψ , é então possível correlacionar a razão da ação cíclica, CSR, com este parâmetro.

Este parâmetro é definido pela diferença entre os índices de vazios no estado de repouso (em triaxial é o correspondente ao estado prévio ao carregamento cíclico) e o correspondente sobre a linha dos estados críticos (LEC) para o mesmo estado de tensão ($\psi = e_0 - e_{ss}$). Na Figura 7 apresenta-se o ábaco correspondente a esta relação, para sismos com uma magnitude de 7,5, caracterizados por 15 ciclos de carga (a que corresponderia um sismo de 15 segundos com uma ação de 1Hz e valor de carga referenciado à média espectral).

Verifica-se que a transição entre a ocorrência de liquefação (lado esquerdo) e a não ocorrência de liquefação (lado direito) é apenas função do parâmetro de estado do material (Jefferies e Been, 2006).

Os valores de e_{ss} , índice de vazios no estado crítico, foram determinados a partir da linha dos estados críticos representada na Figura 2. Na Figura 7 apresenta-se a relação entre os valores de CSR *in situ* e ψ , para os ensaios cíclicos realizados.

Definiu-se uma aproximação aos resultados obtidos, definida pela expressão (7) que é também representada na Figura 8:

$$CRR_{7,5} = 0,03^{-11\psi} \quad (7)$$

Nesta aproximação decidiu-se manter o expoente de variação com ψ , o que pode ser discutível mas que à luz da pequena quantidade de resultados dos ensaios executados em que foi possível definir com clareza os parâmetros de estado foi considerado mais razoável. Como é possível observar, os ensaios que evidenciaram liquefação, moldados com índices de vazios de 0,9 e 0,85, encontram-se acima da curva definida (região susceptível à liquefação), com excepção, mais uma vez, do ensaio LDC60. Os ensaios moldados com um índice de vazios mais baixo, não liquefize-

ram, e encontram-se abaixo da curva. A expressão (8) constitui assim uma proposta preliminar de fronteira entre os estados estáveis e/ou os susceptíveis à liquefacção para a areia de Argel:

$$CRR_{Argel} = 0,06e^{-11\psi} \tag{8}$$

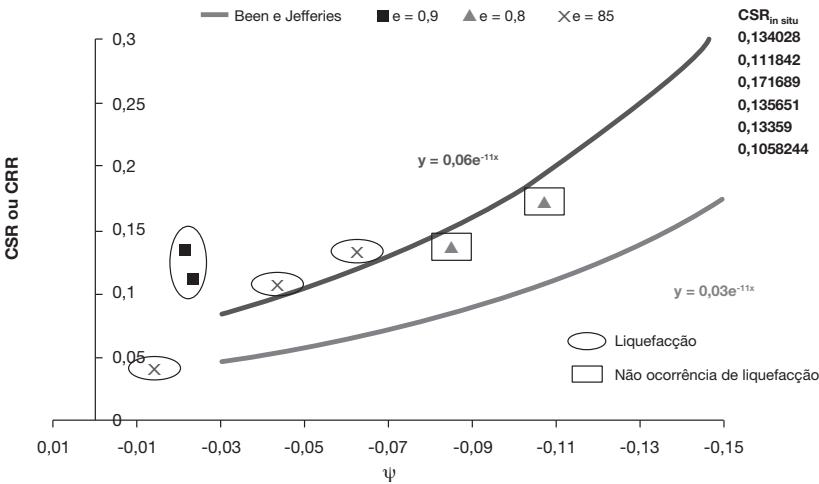


Fig. 8 – Relação entre ψ , e CSR ou CRR (Jefferies e Been, 2006).

5 – CONCLUSÕES

Neste estudo foram realizados 26 ensaios triaxiais, estáticos e cíclicos para determinação das condições de estado limite nas quais a ocorrência do fenómeno é verificada. A investigação decorre ainda na FEUP com uma acumulação de resultados que virá a substanciar as propostas de critérios limites para definição de risco e liquefacção desta areia, mas considera-se já se dispor de dados suficientemente inovadores para aqui se materializar em publicação.

Através dos resultados dos ensaios estáticos realizados, definiu-se a linha dos estados críticos deste material, pela forma da qual se identificaram regiões no espaço de “estado de compacidade” versus “tensões efectivas de repouso”, onde não está presente esse risco de liquefacção. Para tal, associam-se os parâmetros que determinam o “estado” em termos de risco: índice de vazios do material e o estado de tensões efectivas.

Estabeleceram-se as devidas correspondências entre as condições de acção e estado *in situ* e as que foram implementadas em laboratório, onde se utilizaram câmaras triaxiais clássicas e nas quais foram realizados os ensaios cíclicos a partir de estados de tensão anisotrópicos e com frequência de carregamento de 1Hz. Através dos resultados obtidos foi possível identificar em que condições é verificado o fenómeno da liquefacção por mobilidade cíclica com um número de ciclos considerado necessário para se gerar o fenómeno em condições reais, ou seja quando este “colapso” se verifica para um número de ciclos inferior a 15, assumindo que os sismos mais correntes terão tempos de incidência para uma acção espectral ponderada de não mais que 15 segundos (naturalmente para um padrão de frequência de 1Hz).

Por fim, e como corolário dos trabalhos até aqui desenvolvidos, foi verificada a aplicabilidade da formulação dos ábacos de liquefacção com base na velocidade normalizada das ondas de corte, V_{s1} , e foi proposta uma fronteira de estados estáveis e/ou susceptíveis à liquefacção para a areia *Les Dunes* de acordo com a proposta de Berkeley.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer ao Engenheiro Ghili Tahar, doutorando da Faculdade de Engenharia Civil da "Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene", em Argel, Argélia, co-orientado pelo 2º autor deste artigo, por partilhar de algumas bases do seu trabalho de tese e que se encontra em fase de finalização. Manifesta-se também o apreço à Empresa Teixeira Duarte, Engenharia e Construções, S.A., na pessoa do Sr. Eng. Pedro Teixeira Duarte e Sr. Eng. Ivo Rosa pelo apoio financeiro concedido ao abrigo do protocolo de colaboração em actividades de investigação com o Instituto da Construção da FEUP. Este trabalho enquadra-se nos trabalhos do CEC, centro de investigação da FCT na FEUP, e foi financiado parcialmente pelo projecto PTDC/ECM/103220/2008, enquadrado no QREN da Comissão Europeia (UE/FEDER), através do Quadro Operacional para Factores Competitivos – COMPETE.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrus, R. D.; Stokoe, K. H. II (2000). *Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 126 (11), pp. 1015-1025.
- Fonseca, M. A. G. (2009). *Derivação em triaxial cíclico de parâmetros de estado e de acção sísmica que induziram liquefacção de areias dunares num sismo em Argel. Sensibilidade das velocidades de ondas de corte como índice de risco*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Ghili, M. T. (2003). *Liquéfaction du sable "Les Dunes"*. ISSMGE, Congrès Régional Africain de Mécanique des Sols, Dezembro, Marrakech, pp. 8-11.
- Jaky, J. (1944). *The coefficient of earth pressure at rest*. *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, pp. 335-358.
- Jefferies, M.; Been, K. (2006). *Soil liquefaction. A critical state approach*. Taylor & Francis. Estados Unidos da América e Canadá.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle. New Jersey.
- Pinheiro, A. S. A. (2009). *Avaliação em laboratório das condições de estado que conduziram a fenómenos de liquefacção de areias dunares no sismo de 2003 em Boumerdès*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Robertson, P. K. (2004). *Evaluating Soil Liquefaction and Post-earthquake deformations using the CPT*. Keynote Lecture. *Geotechnical & Geophysical Site Characterization*. Ed. A. Viana da Fonseca & P.W. Mayne. Vol. 1, pp. 233-249. Millpress, Rotterdam.
- Rocha, J. M. M. (2010). *Avaliação da susceptibilidade à liquefacção de areias dunares de Argel em ensaios triaxiais monotónicos e cíclicos com avaliação da velocidade das ondas sísmicas*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Seed, H. B.; Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(SM9): 1249-1273.

- Stark, T. D.; Olson, S. M. (1995). *Liquefaction resistance using CPT and field case histories*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 118, GT11, pp. 1727-1747.
- Suzuki, Y.; Tokimatsu, K.; Koyamada, K.; Taya, Y.; Kubota, Y. (1995). *Field correlation of soil liquefaction based on CPT data*. Proc. International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95, Vol. 2, pp. 583-588.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2002). *Bender-elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais*. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, LNEC, Lisboa, Vol. I, pp. 353-365.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Jr., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.D., Marcuson W.F., III, Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B.; Stokoe, K.H., II. (2001). *Liquefaction resistance of soils: summary of report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833.