

MELHORAMENTO DE UM SOLO ARENOSO POR ATIVAÇÃO ALCALINA PARA MITIGAÇÃO DA LIQUEFAÇÃO

IMPROVEMENT OF A SANDY SOIL BY ALKALINE ACTIVATION FOR LIQUEFACTION MITIGATION

Rios, Sara; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, sara.rios@fe.up.pt*

Ferreira, Cristiana; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, cristiana@fe.up.pt*

Viana da Fonseca, António; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, viana@fe.up.pt*

RESUMO

A liquefação sísmica tem consequências devastadoras provocando danos materiais e perdas humanas, pelo que é fundamental tomar medidas para mitigar ou minimizar esses danos. Neste trabalho, foi avaliada a resistência à liquefação de um solo arenoso da zona de Coimbra com granulometria uniforme enquadrada nos limites de solos capazes de desenvolver liquefação. Foi também avaliada a correção granulométrica deste solo através da introdução de finos, com diferentes percentagens do mesmo solo moído ou de cinzas volantes, bem como a resistência à liquefação dessas frações finas. Para esse efeito, foram realizados ensaios triaxiais de compressão monotónica não drenados, bem como várias medições da velocidade de propagação das ondas sísmicas P e S através de *bender elements* e transdutores ultrassónicos. Os resultados dos ensaios triaxiais mostraram que o tratamento por correção granulométrica por si só não impede a liquefação da areia de Coimbra, pelo que se procedeu à estabilização química do solo através da ativação alcalina, sendo a resistência à liquefação avaliada através da velocidade de propagação das ondas sísmicas. Neste caso, a composição dos provetes consistiu numa mistura de solo e cinzas volantes, ao qual se juntou o ativador alcalino constituído por água, silicato de sódio e hidróxido de sódio. Várias concentrações de ativador foram testadas, nas quais se mediram velocidades das ondas de corte muito superiores àquelas medidas nos ensaios triaxiais onde se observou liquefação. A realização de um ensaio triaxial com uma amostra estabilizada quimicamente comprovou o aumento da resistência conseguido pelo tratamento químico, uma vez que esta não liquefez contrariamente ao que tinha ocorrido nas misturas não estabilizadas.

ABSTRACT

Earthquake-induced liquefaction can cause significant damages in buildings and loss of human lives. Therefore, it is fundamental to implement measures to minimize the damage associated to liquefaction. In this work, the liquefaction resistance of a uniform sandy soil from Coimbra region was evaluated. The grading correction of the soil by the introduction of fines in different percentages (with ground soil or with fly ash) was evaluated as an improvement technique. The liquefaction resistance of the fine soil was also assessed. For this purpose, monotonic undrained triaxial compression tests were carried out, as well as seismic wave measurements by means of bender elements and ultrasonic transducers. Triaxial test results showed that the grading correction was not sufficient to avoid liquefaction, and so a chemical stabilisation was performed with an alkali activated binder, being the liquefaction resistance evaluated through seismic wave measurements. In this case, the specimens were prepared from a mixture of soil and fly ash, to which the activator, made from water, sodium silicate and sodium hydroxide, was added. Different concentrations of the activator were tested, resulting in shear wave velocities much higher than the ones obtained in the liquefied triaxial specimens. In addition, the execution of one triaxial test on a chemically stabilised specimen proved the significant increase in liquefaction resistance given by the chemical treatment, since this specimen did not liquefy as verified in the non-stabilised mixtures.

1 - INTRODUÇÃO

A liquefação é um fenómeno que origina a perda de resistência e rigidez do solo devido ao aumento da pressão neutra que por sua vez anula as tensões efetivas. É um fenómeno destrutivo, originando assentamentos que levam ao colapso de edifícios, infraestruturas, pontes, barragens de aterro, entre outros. Por exemplo, no evento sísmico recente de Christchurch na Nova Zelândia em 2011, a destruição causada pela liquefação foi muito significativa, para além dos estragos provocados pelo abalo sísmico propriamente dito. Este efeito foi visível pelas extensas erupções de areia saturada que cobriram grande parte das ruas de alguns subúrbios da cidade, bem como nos bairros residenciais da parte oriental da zona económica central (Central Business District) onde vários edifícios de andares foram destruídos. Nessa zona, o desempenho sísmico dos edifícios bem com as infraestruturas da cidade (água, saneamento,

telecomunicações, gás, eletricidade, entre outros) foram severamente afetadas pela liquefação do solo (Bray et al., 2017).

A liquefação cíclica ocorre em solos soltos e saturados submetidos a carregamentos rápidos e oscilações do terreno, tais como sismos, explosões e até mesmo cravação de estacas. Em consequência de tais solicitações, o solo solto rearranja-se e tende a diminuir de volume, mas a água não conseguindo escapar rapidamente faz aumentar a pressão neutra, o que leva à diminuição da tensão efetiva. A redução da tensão efetiva provoca uma diminuição da rigidez, o que leva ao aumento das deformações e favorece a taxa de aumento da pressão neutra. Sendo a resistência ao corte diretamente dependente das tensões efetivas, quando estas se anulam ocorrem assentamentos e aberturas de fendas, verificando-se o colapso das estruturas e infraestruturas assentes no solo que liquefez bem como rotura de barragens de aterro e de taludes naturais.

A liquefação pode ocorrer de duas formas, liquefação por fluxo ou liquefação cíclica, consoante o tipo de carregamento. A liquefação por fluxo só ocorre se o solo se encontrar no estado solto e pode ser desencadeada por carregamentos monotónicos ou cíclicos. Neste caso, a tensão de corte necessária para o equilíbrio estático é superior à tensão de corte para o solo liquefeito (Rocha, 2010). A liquefação ou mobilidade cíclica é desencadeada por carregamento cíclico, ocorrendo em solos de compacidade média mesmo ligeiramente maior que a condição crítica, quando a tensão de corte estática é inferior à resistência no estado permanente. A distinção entre liquefação por fluxo e liquefação cíclica é realizada com base na teoria dos estados críticos a partir do parâmetro de estado, definido pela diferença entre o índice de vazios in situ e o índice de vazios do solo no estado crítico.

A suscetibilidade de um solo à liquefação depende de vários fatores, como sistematizados por Kramer (1996):

- critérios históricos, decorrentes da atividade sísmica do local, incluindo fatores como a magnitude, aceleração e duração do sismo;
- critérios geológicos, decorrentes da origem, formação, fábrica e estrutura dos solos, incluindo a permeabilidade e coesão do solo que afetam a geração dos excessos de pressão neutra e consequente redução da pressão efetiva;
- critérios relacionados com a composição do solo, incluindo composição granulométrica e forma das partículas;
- critérios de estado, incluindo grau de saturação, estado de tensão inicial e densidade relativa do solo.

Considerando estes critérios, foram definidas várias metodologias para avaliação da suscetibilidade à liquefação. A maioria destas metodologias baseia-se em parâmetros decorrentes de ensaios in situ como o ensaio SPT, o CPTU ou o DMT. No entanto, existem também métodos baseados na velocidade de propagação das ondas de corte (V_s), diretamente relacionáveis com o módulo de distorção máximo do solo, que podem ser facilmente obtidas tanto em campo como em laboratório. Estas metodologias consistem em relacionar os parâmetros dos ensaios com a resistência cíclica do solo através do parâmetro CRR (cyclic resistance ratio). Comparando o valor de CRR como o valor da ação sísmica do local definida pelo CSR (cyclic stress ratio), é possível avaliar se o local tem suscetibilidade de liquefazer ou não.

No sentido de evitar este fenómeno, têm-se estudado vários métodos de mitigação da liquefação, quer através do reforço da capacidade resistente do solo, quer pela alteração das suas características e comportamento ou pela sua estabilização mecânica e/ou química.

Dentre as soluções possíveis enumeram-se as seguintes:

- correção granulométrica através da adição de finos. No entanto, como descrito por Lade e Yamamuro (1997) a adição de finos tanto pode ser benéfica como prejudicial para a ocorrência de liquefação;
- compactação do solo com recurso a vibrocompactadores e martelos de impacto;
- substituição do solo por outro de melhores características mecânicas;
- rebaixamento do nível freático ou redução do nível de saturação do solo com recurso a injeção de ar;
- soluções de estabilização química, onde se incluem as várias formas de ligação das partículas de solo através de cal, gesso, cimento Portland, entre outros. Neste trabalho estudou-se a utilização de um ligante alternativo resultante da ativação alcalina de cinzas volantes.

2 - LIGANTES GERADOS PELA ATIVAÇÃO ALCALINA DE CINZAS

A ativação alcalina é uma reação de geopolimerização de aluminossilicatos sólidos que ocorre em meio alcalino, por exemplo com soluções de hidróxido ou silicato de potássio ou de sódio. É um processo químico que permite a transformação de determinadas estruturas parcial ou totalmente amorfas, em estruturas com propriedades cimentícias (Palomo et al., 1999).

A grande maioria dos aluminossilicatos são de natureza cristalina, portanto, bastante estáveis para estar envolvidos em qualquer tipo de reação. Para promover as condições para a ativação alcalina e para melhorar os resultados, as matérias-primas de aluminossilicatos devem ser submetidas a um prévio tratamento térmico. Isto irá induzir a perda de água e o correspondente rearranjo dos íons de alumínio e de oxigênio transformando o material cristalino em outro, amorfo. Essas mudanças estruturais promovem um ambiente em que as combinações químicas são mais fáceis. Por essa razão, matérias-primas com uma história térmica natural ou artificial, como cinzas volantes, escória de alto forno, resíduos de cimento Portland, resíduos pozolânicos ou metacaulino, são mais adequados para promover a ativação alcalina. Consequentemente, os materiais calcinados têm taxas de ganho de resistência maior nos primeiros estágios da ativação alcalina, embora alguns materiais não-calcinados possam desenvolver ganho de resistência razoável em fases posteriores do processo, em condições específicas de temperatura e pressão.

A reação de ativação alcalina de cinzas volantes ocorre através de um processo de dissolução exotérmica durante a qual se quebram as ligações covalentes Si – O – Si, Al – O – Al e Al – O – Si da fase vítrea da matéria-prima, originando íons de sílica e alumina. O produto resultante da destruição das cinzas volantes acumula-se durante um período de tempo durante o qual não há liberação de calor. Após esse período de equilíbrio, ocorre a formação de um gel resultante da condensação da estrutura produzida. Este gel toma a função de ligante e desenvolve a reorganização das partículas do solo, o qual adquire maior resistência mecânica (Duxson et al., 2007). Assim que o aluminossilicato é misturado com a solução alcalina, o processo de endurecimento começa não deixando tempo e espaço suficiente para o gel se transformar numa estrutura bem cristalizada, como é o caso da formação de zeólitos (Xu e van Deventer, 2000).

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - Materiais

No presente trabalho, utilizou-se areia extraída das margens do rio Mondego, em Coimbra, simplesmente designada Areia de Coimbra, a qual foi objeto de estudo de diversos autores (Soares, 2014; Teixeira, 2015; Castro, 2015). As cinzas volantes utilizadas como precursor na reação de ativação alcalina são de classe F, com baixo teor em cálcio. O ativador alcalino foi produzido misturando uma solução de silicato de sódio comercial (SS) com uma solução de hidróxido de sódio (HS) preparado para a concentração desejada, por dissolução de hidróxido de sódio em água. A solução SS utilizada apresenta uma densidade aparente de 1,464 g/cm³ a 20° C, numa proporção SiO₂/Na₂O de peso de 2,0 (razão molar de 2,063) e uma concentração de Na₂O na solução de 13,0%. Os flocos de HS tinham um peso específico de 2,130 a 20° C (99% em peso).

Para a moldagem dos provetes tratados com o ligante de ativação alcalina, em primeiro lugar foram separadas e pesadas as quantidades de solo e cinza necessárias. O HS em estado líquido foi misturado com o SS líquido, formando assim a solução alcalina designada de ativador. Após a preparação dos materiais, procedeu-se à mistura do solo com as cinzas, juntando-se depois a solução alcalina até obter uma mistura homogênea.

Com o objetivo de estudar a influência dos finos na resistência da areia de Coimbra à liquefação, procedeu-se à moagem da areia através de um moinho elétrico. De forma a aproximar o mais possível a granulometria do solo à das cinzas volantes, realizaram-se duas moagens diferentes. A primeira teve a duração de 5 minutos a uma velocidade de 350 rpm (solo moído 1) e a segunda 15 minutos a uma velocidade de 350 rpm (solo moído 2). Para o presente trabalho foram preparadas várias misturas com diferentes percentagens de cinzas. Na Figura 1 apresentam-se as curvas granulométricas do solo e das cinzas, bem como as várias combinações de areia e solo moído ou cinzas. As curvas granulométricas das cinzas e do solo moído foram determinadas num granulómetro laser, enquanto a areia foi determinada por peneiração segundo a norma ASTM D 2487-85. A curva granulométrica de cada mistura foi posteriormente obtida por combinação das curvas granulométricas de cada material. Para tal, as percentagens de volume acumulado de cada material foram multiplicadas pela percentagem que se encontram em cada mistura, tendo-se construído as curvas granulométricas apresentadas na Figura 1.

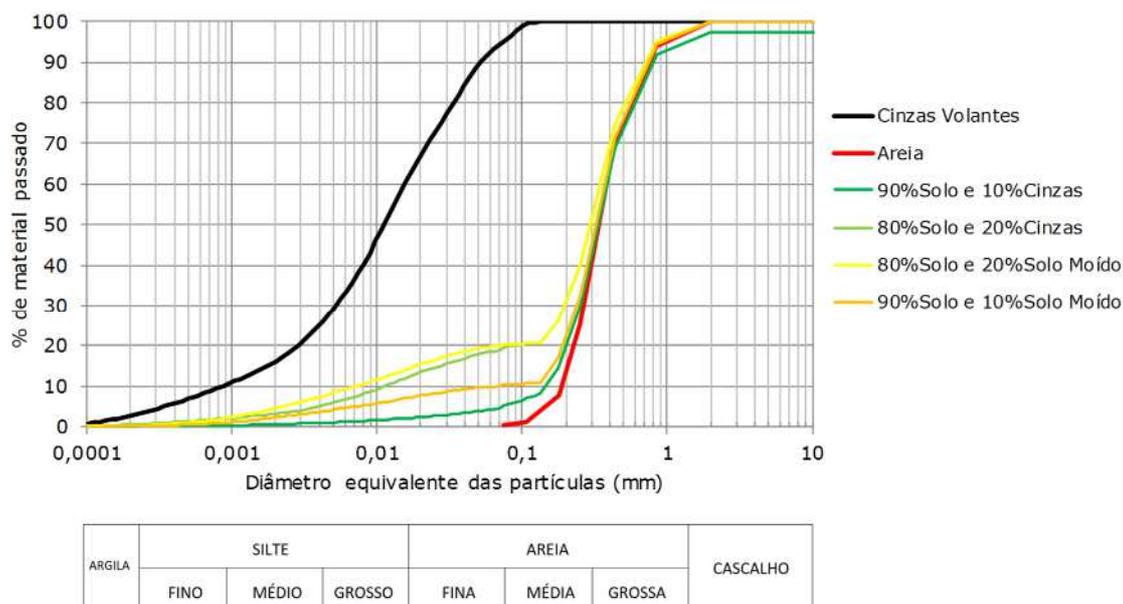


Figura 1 – Curva granulométrica da areia de Coimbra e das misturas ensaiadas

A partir destas curvas, foram determinados os respetivos coeficientes de uniformidade e curvatura, os quais aumentam significativamente com a percentagem de finos (Quadro 1).

Quadro 1 – Valores dos diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} e respetivos coeficientes de uniformidade e curvatura

Curva	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c
Solo – Areia de Coimbra	0,25	0,32	0,40	1,60	1,03
90% Solo e 10% Cinzas	0,07	0,25	0,40	5,71	2,23
80% Solo e 20% Cinzas	0,01	0,18	0,38	38,00	8,53
90% Solo e 10% Solo Moído	0,07	0,25	0,40	5,71	2,23
80% Solo e 20% Solo Moído	0,007	0,18	0,38	54,29	12,18

Foram ainda realizados ensaios para determinação do peso volúmico das partículas sólidas, tendo-se obtido um valor médio de γ_s de 26,04 kN/m³, e dos índices de vazios máximo e mínimo, correspondentes a $e_{max}=0,810$ e $e_{min}=0,479$.

3.2 - Ensaios e procedimentos

Foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios de bancada para avaliação da velocidade de propagação das ondas sísmicas e ensaios triaxiais de compressão monotónica em condições não drenadas. Uma vez conhecida a velocidade das ondas sísmicas dos ensaios triaxiais é possível analisar o efeito do tratamento químico do solo face à liquefação, comparando as velocidades das ondas sísmicas nos dois casos.

As amostras de bancada foram realizadas em moldes de PVC revestidos com uma membrana impermeável de latex vedados inferiormente por uma pedra porosa envolvida em película aderente, para evitar o contacto com o ativador alcalino, e fita-cola. A membrana é fixada ao molde com a ajuda de um o-ring. A utilização da membrana visa facilitar a extração do provete do molde, uma vez que se tratam de provetes muito frágeis.

Os ensaios de bancada fizeram uso de transdutores piezoeléctricos do tipo *bender elements* (Viana da Fonseca e Ferreira, 2002; Viana da Fonseca et al., 2009). As ondas sísmicas são geradas com o auxílio de um gerador de funções (TTi TG1010), o qual emite um sinal que é enviado para o transmissor, podendo ser previamente amplificado através de um amplificador específico. O registo e observação da propagação das ondas são realizados com recurso a um osciloscópio de elevada resolução e precisão que permite ler, em cada momento, o intervalo de tempo que decorre entre a emissão e a receção do sinal. O osciloscópio (Tektronix TDS220) está ligado a um computador que adquire os dados a partir do programa de controlo e aquisição WaveStar, permitindo a posterior análise e interpretação das ondas sísmicas. Para efetuar a

medição do tempo de propagação das ondas sísmicas nas amostras de bancada, com *bender elements*, fez-se uma pequena ranhura no topo e na base da amostra, previamente vedados com película aderente.

Usaram-se ainda transdutores ultrassónicos, os quais são ligados a uma unidade de controlo e aquisição (Pundit Lab) que por sua vez está ligado ao computador. O contacto entre amostra e o transdutor é melhorado com a aplicação de um gel condutor. O transdutor emissor envia uma onda de impulso ultrassónico que atravessa o material e é recebido pelo transdutor recetor. Este equipamento disponibiliza apenas algumas frequências de trabalho: 24, 37, 54, 82, 150, 200, 220 e 500 kHz. Para determinar a velocidade das ondas P, mais rápidas, são utilizadas frequências altas, enquanto que para medir a velocidade das ondas S, correspondentes a maiores tempos de propagação, utilizam-se frequências mais baixas. Através do programa de controlo e aquisição (Proced Punditlink) é possível fazer o tratamento e análise das ondas sísmicas.

O procedimento de ensaio consistiu na medição do tempo de propagação das ondas sísmicas no 1º, 2º, 3º, 7º, 14º, 21º e 28º dias de cura com ultrassons e *bender elements*. O Quadro 2 especifica as características das misturas preparadas para as amostras de bancada estudadas neste trabalho. Neste quadro indica-se para cada caso o índice de vazios pretendido na moldagem, o teor em água e teor em líquido (razão entre a quantidade de ativador e a quantidade de solo e cinzas) das misturas, a razão entre o silicato de sódio e o hidróxido de sódio (SS/SH), a concentração do hidróxido de sódio, a percentagem de cinzas no solo seco, o peso volúmico da mistura obtido por média ponderada em função da percentagem de cinza, e o peso volúmico seco desejado.

Quadro 2 – Características dos provetes ensaiados na bancada

Mistura	e_0	W água (%)	W líquido (%)	SS/SH	[NaOH] (molal)	Cinzas/solo (%)	ρ_s (kN/m ³)	ρ_c (kN/m ³)
AA1	0,78	21,43	30	0,25	3	0,10	25,68	14,46
AA2	0,78	14,88	25	0,50	3	0,10	25,68	14,46
AA3	0,78	16,67	30	0,50	5	0,10	25,68	14,46
Solo	0,78	20	20	-	-	-	26,03	14,62

Para a realização dos ensaios triaxiais, as amostras foram preparadas pela técnica de compactação ligeira em condições húmidas, designada correntemente na literatura internacional por *moist tamping*. A técnica consiste em introduzir no molde a quantidade de solo previamente calculada em cinco ou seis camadas e no final de cada camada compactar ligeiramente o solo com uma peça de fundo raso até à altura pretendida. A energia de compactação aplicada a cada camada deve ser ajustada em função da compacidade desejada (Matos Fernandes, 2011). Uma amostra de solo tratado com o ligante alternativo foi também sujeita a um ensaio triaxial, preparada pela técnica *moist tamping* num molde metálico cilíndrico e tripartido, de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, envolvido por uma membrana impermeável. A preparação desta amostra foi realizada na bancada e no final foi colocada numa câmara de temperatura controlada, onde permaneceu até aos 25 dias de cura, momento em que se retirou o molde e se instalou na câmara triaxial, até ao corte aos 28 dias.

Depois da instalação do provete na célula triaxial, deixou-se percolar dióxido de carbono através do provete para facilitar a remoção do ar. De seguida, a percolação de água preparou a amostra para o estágio seguinte: saturação. Usando estes procedimentos preliminares, a saturação da areia foi bastante rápida e tanto a pressão na célula como no interior do provete puderam ser incrementadas simultaneamente com uma velocidade de 1 kPa/min mantendo uma tensão efetiva de 10 kPa. Quando a pressão na célula e no interior do provete atingiram 310 e 300 kPa respetivamente, o parâmetro B de Skempton foi medido tendo-se obtido valores superiores a 0.97. Na amostra tratada com ligante não foi possível medir o parâmetro B dada a limitação do equipamento no ensaio de solos com este novo ligante, mas a contrapressão foi aumentada até 500 kPa mantendo-se durante 5 dias antes de se iniciar a consolidação. Os ensaios triaxiais realizados foram todos consolidados isotropicamente a 50 kPa de tensão efetiva média, registando-se a variação de volume durante a consolidação, através da saída de água da amostra.

O corte monotónico foi realizado com deformação controlada, em condições não drenadas, impondo na prensa uma velocidade de deslocamento de 0,0216 mm/min. O Quadro 3 especifica as características dos provetes testados nos ensaios triaxiais, indicando para cada caso, o tipo de câmara triaxial, o índice de vazios inicial (após montagem), o teor em água de moldagem, a percentagem de cada componente sólido (solo, cinzas, solo moído) e as características do ativador, no caso do solo tratado com o ligante alternativo.

Quadro 3 – Características dos provetes ensaiados em câmaras triaxiais

Provete	Equipamento	e_0	w (%)	Solo (%)	Cinzas (%)	Solo moído (%)	SS/SH	[NaOH] (molal)
1	TX	0,622	5,84	90	10	-	-	-
2	TX	0,632	5,83	80	20	-	-	-
3	TX	0,672	5,86	90	-	10	-	-
4	TX	0,590	5,38	80	-	20	-	-
5	TX SP	1,020	12,29	-	100	-	-	-
6	TX SP	1,155	12,44	-	100	-	-	-
7	TX AA	0,679	4,44	90	10	-	0,25	3
8	TX	0,778	5,09	100	-	-	-	-

Para as amostras de solo tratado quimicamente através da cimentação criada pelo ligante alternativo resultante da ativação alcalina das cinzas volantes, começou-se por analisar a velocidade de propagação das ondas sísmicas em amostras de bancada que permitissem afinar a dosagem da mistura. A definição das quantidades de cada componente resultou de um compromisso entre a cimentação suficiente para permitir o manuseamento da amostra e impedir a liquefação e, os mais baixos consumos de ativador e cinzas para a mistura ser a mais económica possível. Para esse efeito, a medição da velocidade das ondas sísmicas revelou-se essencial, porque os ensaios triaxiais entretanto realizados permitiram perceber quais os valores das velocidades das ondas sísmicas que conduziam a liquefação. Tendo estes valores como referência, baixaram-se as quantidades de ativador que são o componente mais caro destas misturas. O estudo da reação de ativação alcalina das cinzas volantes realizou-se a partir de amostras cilíndricas com diferentes relações mássicas entre o silicato de sódio e o hidróxido de sódio (SS/SH), concentrações molal de hidróxido de sódio ([NaOH]), teor em água (w), teor em líquido ($w_{líquido}$), e com igual relação mássica entre as cinzas e o solo (cinzas/solo) e índice de vazios (e_0). Inevitavelmente, a preparação das amostras de bancada e para ensaios triaxiais é diferente. De forma a permitir a comparação dos dois métodos, foi ainda realizado um outro ensaio de bancada com solo e 20% de água, de modo a permitir a comparação, a nível da velocidade de propagação das ondas sísmicas, com o ensaio triaxial de areia saturada, TX8, realizado em parceria com Teixeira (2015).

4 - RESULTADOS

4.1 - Ensaio triaxiais

As curvas tensão-deformação-pressão neutra obtidas nos ensaios triaxiais indicados no Quadro 3 estão representadas nas Figuras 2 e 3. Para melhor legibilidade da figura, adotou-se para o provete de solo tratado TX7 um eixo secundário para a tensão de desvio. Todos os ensaios apresentam pico de resistência não drenada para uma pequena deformação axial, aproximadamente 2%. Após o pico sofrem uma queda repentina até praticamente se anularem, para uma deformação axial de 25%, aproximadamente. Para além disso, o excesso de pressão neutra toma valores semelhantes às tensões efetivas de consolidação. Esta situação provoca a perda total de resistência do solo, quebrando-se as ligações existentes entre os grãos da amostra, ocorrendo liquefação por fluxo. Curiosamente, o ensaio TX3 (90% solo e 10% solo moído) apresentou maior tensão de pico que o ensaio TX1 (90% solo e 10% cinzas) apesar de este ter um menor índice de vazios no início do corte. Note-se que o solo moído tem granulometria idêntica à das cinzas, pelo que a explicação só pode estar na própria natureza mineralógica e forma das partículas. Da mesma forma, o ensaio TX4 (80% solo e 20% solo moído) tem mais resistência que o ensaio TX2 (80% solo e 20% cinzas). No entanto, neste caso, atendendo à menor diferença entre as resistências e aos valores de índices de vazios, a explicação poderia ser devido ao menor índice de vazios do ensaio TX4 (80% solo e 20% solo moído). Nesse sentido, mais ensaios seriam necessários para confirmar esta informação.

Por outro lado, com exceção do ensaio TX3 (90% solo e 10% solo moído), todos os ensaios de solo com aumento de finos exibiram menor resistência que o ensaio TX8 (100% solo) de solo puro, o que se justifica pela menor resistência ao corte dos finos relativamente à areia. Quanto maior a quantidade de finos, maior a contração volumétrica porque as partículas finas tendem a entrar nos espaços vazios, diminuindo o índice de vazios, permitindo que as partículas de maiores dimensões se movam em conjunto.

Os ensaios triaxiais TX5 (100% cinzas, $e_0=1,020$) e TX6 (100% cinzas, $e_0=1,155$) exibiram comportamentos semelhantes, uma vez que o índice de vazios inicial é bastante próximo. Tratando-se de amostras de solo fino (100% cinzas), era de esperar a menor resistência de pico de todas as amostras. No entanto, verifica-se que, apesar de ambas as amostras apresentam resistência de pico inferior a TX8 (100% solo), têm maior resistência ao corte do que TX1 (90% solo e 10% cinzas).

Apesar de não se ter sido possível medir os excessos de pressão neutra no ensaio triaxial do provete de solo tratado (ensaio TX7), pode observar-se que a tensão de desvio não se anula, estabilizando aos 60kPa, aproximadamente, não ocorrendo liquefação.

Além disso, neste ensaio TX7 (90% Solo e 10%cinzas, $SS/SH=0,25$ e $[NaOH]=3molal$), a tensão de pico atingiu um valor muito superior ao dos restantes ensaios pelo que se considera ser a amostra mais consistente, no qual é necessário maior força para romper as ligações interparticulares.

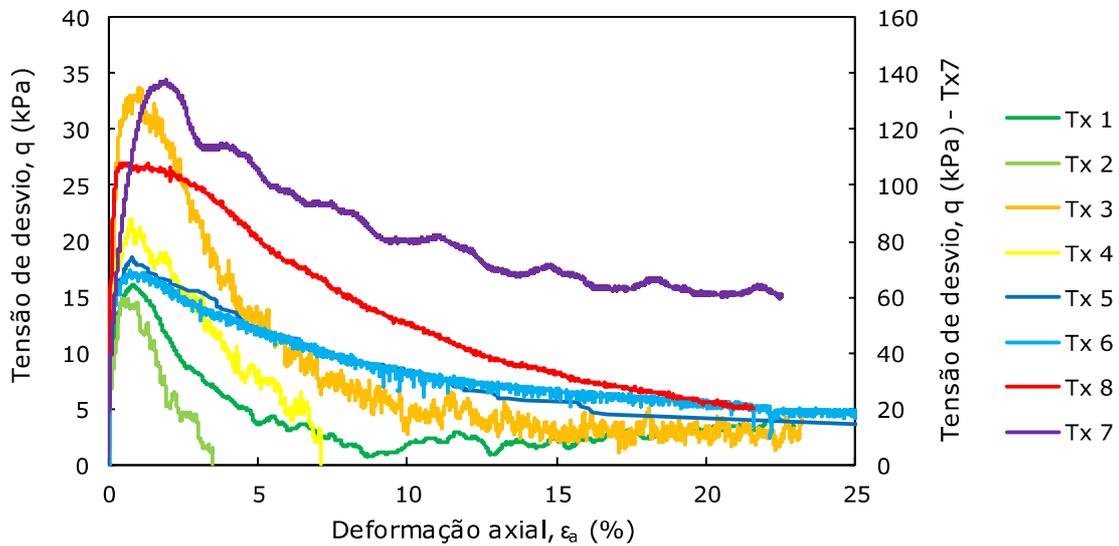


Figura 2 – Curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios triaxiais

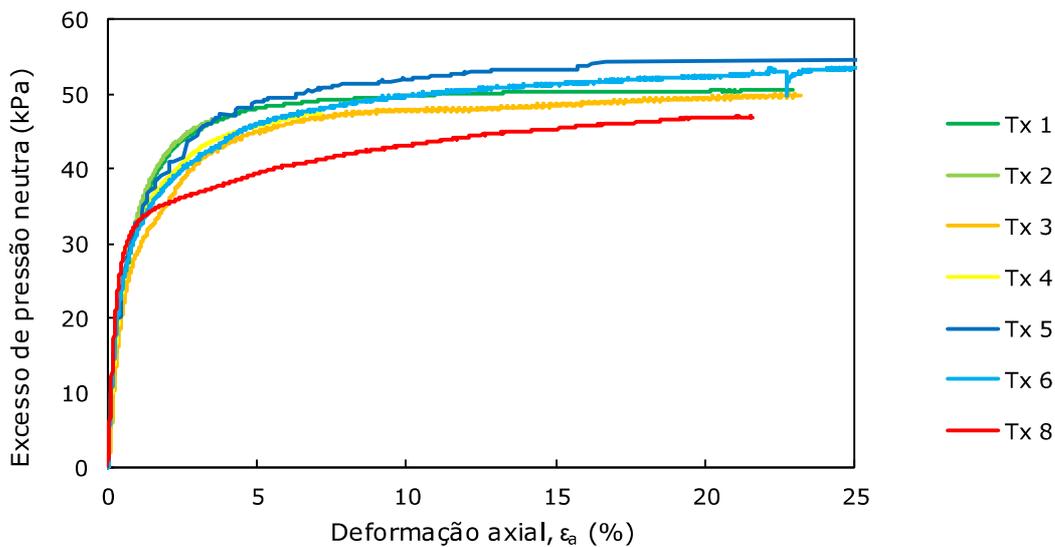


Figura 3 – Curvas de excesso de pressão neutra-deformação obtidas nos ensaios triaxiais

O tempo de propagação das ondas de corte foi medido ao longo da fase de corte do ensaio para diferentes níveis de deformação, tendo sido possível estabelecer uma relação ϵ_a-V_S , que se apresenta na Figura 4. Os valores da velocidade das ondas de corte em cada um dos ensaios está, na generalidade, de acordo com as várias resistências de pico observadas na Figura 2, mostrando que a rigidez elástica (traduzida neste caso pela velocidade de propagação das ondas S) está diretamente relacionada com a resistência. Por outro lado, é interessante verificar que a velocidade das ondas de corte diminui à medida que a tensão de desvio reduz e a deformação axial aumenta, sendo um bom indicador da redução do estado de tensão efetivo, associado ao processo de liquefação do solo.

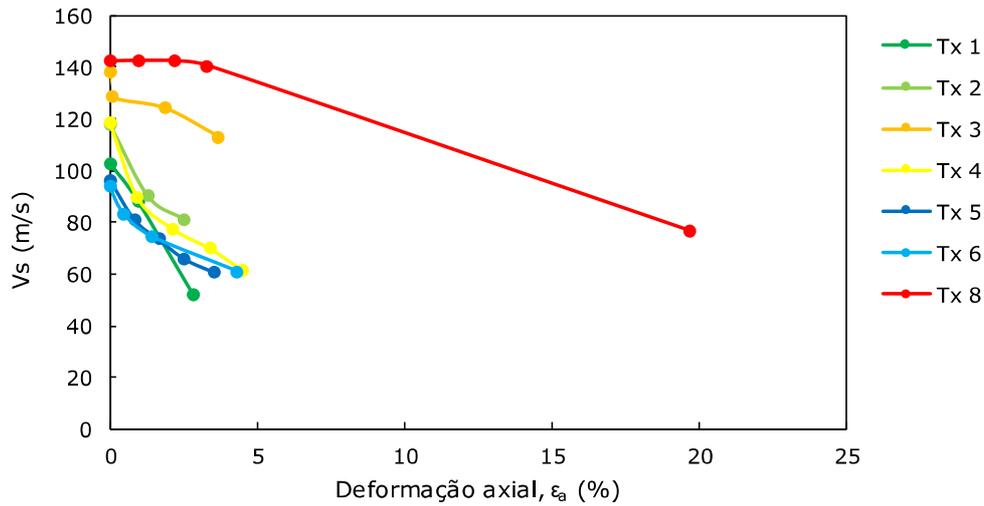


Figura 4 – Evolução da velocidade de propagação das ondas S durante o ensaio triaxial

4.2 - Ensaios de bancada

Nas amostras de bancada tratadas quimicamente por ativação alcalina de cinzas volantes (ver resumo das características no Quadro 2), efetuaram-se medições do tempo de propagação das ondas P e S aos 1º, 2º, 3º, 7º, 14º, 21º e 28º dias de cura, com recurso a *bender elements* ou ultrassons. A evolução das velocidades V_P e V_S ao longo desse período de cura é apresentada na Figura 5.

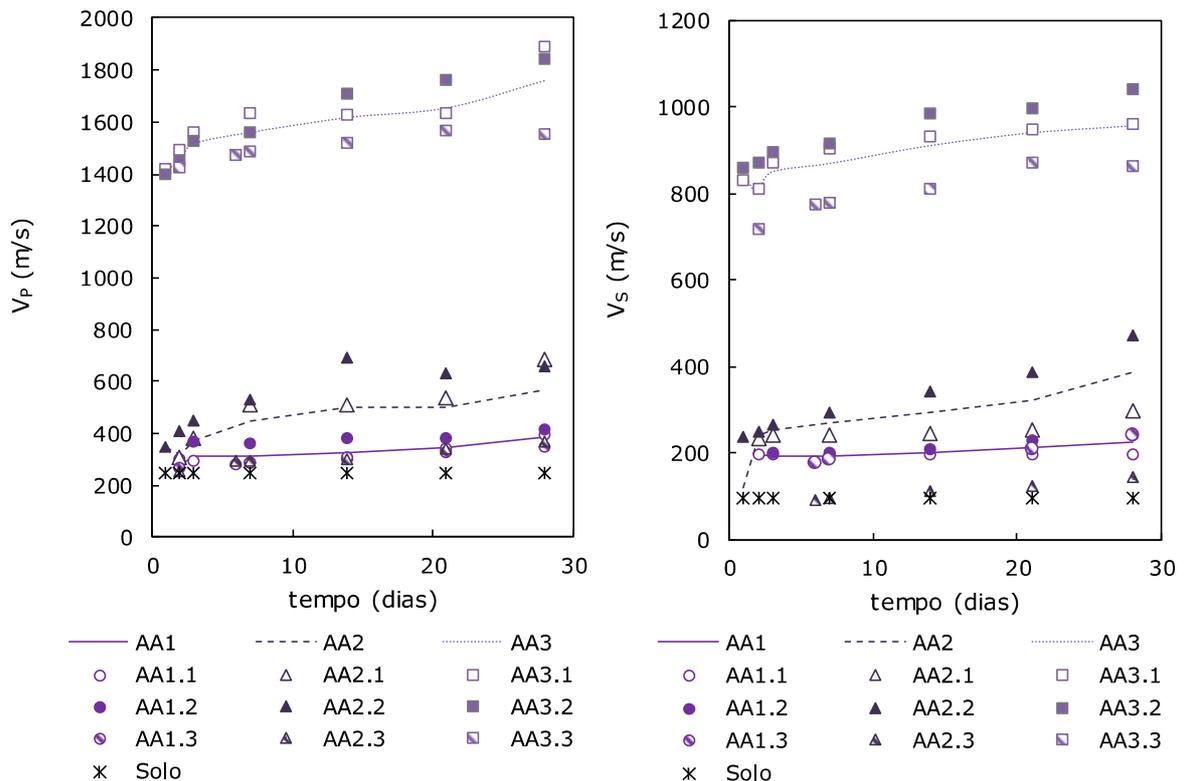


Figura 5 – Velocidades de propagação das ondas sísmicas V_P e V_S nos provetes de bancada até 28 dias

Uma vez que a preparação das amostras de bancada é diferente da preparação das amostras dos ensaios triaxiais, como forma de validação destas medições, foi preparada uma amostra de solo sem ativação alcalina, que serviu de base a este estudo e como termo de comparação entre os dois ensaios. Essa amostra de solo foi moldada com um teor em água de 20%, tendo-se medido as velocidades das ondas sísmicas logo de imediato. Constatou-se uma proximidade entre os valores das velocidades das ondas sísmicas desta amostra com os da amostra TX8 (100% solo, no ensaio triaxial) na fase inicial do ensaio, indicando que as velocidades das ondas obtidas nos ensaios de bancada são comparáveis e indicativas das mesmas medidas no ensaio triaxial.

Nas amostras de bancada AA1 e AA2, mediram-se velocidades das ondas de corte mais baixas do que as das amostras AA3, sendo que as amostras AA1 apresentam as menores V_S . Tal situação decorre da diferente relação SS/SH das duas amostras, sendo que a concentração de hidróxido de sódio é igual nas duas (3 molal). As amostras AA1 têm uma relação SS/SH de 0,25, inferior à das amostras AA2 que é de 0,50. As amostras AA3 apresentam valores de V_S muito superiores, devido ao aumento da concentração de hidróxido de sódio para 5 molal e uma relação SS/SH de 0,50.

De notar que a amostra do ensaio triaxial TX7, ensaio de uma amostra de solo tratada com geopolímeros através da ativação alcalina das cinzas volantes, foi preparada com a mesma composição das amostras de bancada AA1, que se verificou ser a menos resistente. Uma vez que esta amostra não sofreu liquefação, tendo por base a velocidade das ondas sísmicas das outras amostras, conclui-se que o tratamento químico aplicado às amostras AA2 e AA3 é suficiente para evitar liquefação, pois estas amostras são mais consistentes do que AA1. Pode ainda verificar-se que a resistência ao corte, no ensaio triaxial TX7, da amostra tratada quimicamente, é bastante superior à verificada nas amostras tratadas apenas por correção granulométrica.

Assim, tendo por base a curva CRR-Vs1 definida por Andrus e Stokoe (2000) e Andrus et al. (2003), apresentada na Figura 6, verifica-se que as velocidades das ondas de corte medidas na bancada em amostras tratadas com geopolímeros, aos 28 dias, se encontram na zona correspondente a solos não suscetíveis à liquefação. Para esta representação, as velocidades devem ser normalizadas segundo a expressão:

$$V_{S1} = V_S \cdot C_{Vs} = V_S \cdot \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \cdot 0,25 \quad (1)$$

Onde V_S é a velocidade da onda de corte, p_a é a pressão atmosférica (=100 kPa) e σ'_{v0} é a tensão vertical efetiva de repouso (nas mesmas unidades de p_a). Neste caso dos ensaios de bancada, uma vez que o estado de tensão é muito baixo, adotou-se o valor máximo de 1,5 para C_{Vs} , segundo proposta de Kayen et al. (2013). Relativamente à ação sísmica, assumiram-se valores de CSR correspondentes à região de Coimbra, de acordo com o prescrito no Eurocódigo 8 (CEN, 2010).

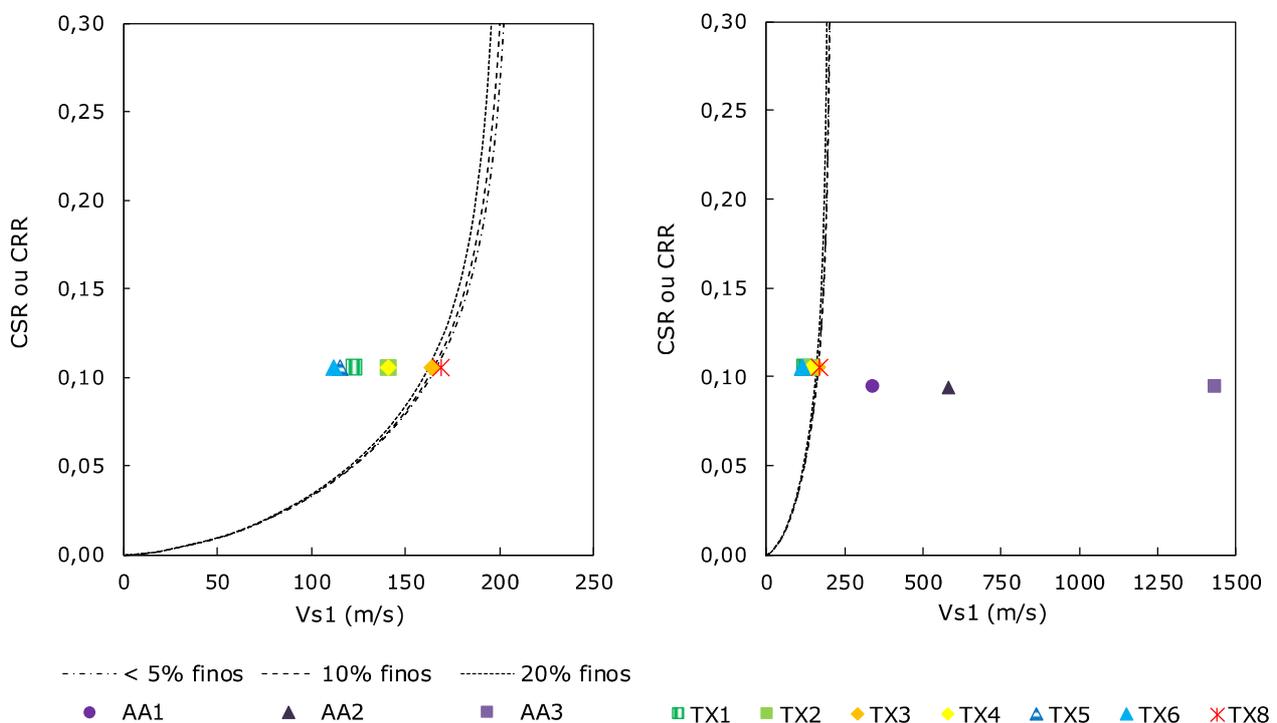


Figura 6 – Curvas CSR ou CRR versus V_{S1} das amostras AA de bancada (aos 28 dias) e triaxiais

A partir das velocidades das ondas de corte obtidas no final da consolidação nos ensaios triaxiais que liquefizeram, adquiriu-se um valor de referência para o qual ocorre liquefação para aquela solicitação. Nos ensaios triaxiais verificou-se liquefação estática para valores da velocidade das ondas de corte inferiores a 163 m/s.

Por outro lado, as velocidades das ondas de corte das amostras de bancada tratadas quimicamente foram claramente superiores às verificadas nos ensaios triaxiais de amostras não tratadas, tendo-se registado valores que vão aumentando ao longo do tempo. Para o tempo de referência de 28 dias de cura, foram obtidos valores claramente superiores a 250 m/s.

5 - CONCLUSÕES

Este artigo analisa a resistência à liquefação de uma areia limpa, conhecida por areia de Coimbra, a qual foi sujeita a dois tipos de tratamentos: correção granulométrica através da adição de finos (cinzas e solo moído) e estabilização química através de um cimento alcalino gerado pela mistura de cinzas volantes e uma solução alcalina. Esta análise foi feita através de ensaios triaxiais de compressão monotónica em condições não drenadas e através de ensaios de medição da velocidade de propagação das ondas sísmicas P e S com *bender elements* e transdutores ultrassónicos.

A areia limpa mostrou ter um elevado potencial de liquefação, em concordância com evidências locais naquela zona aquando de sismos anteriores, nomeadamente em 1909. Por outro lado, a correção granulométrica através da adição de finos não se revelou eficaz para reduzir esse potencial de liquefação, pelo que se optou pela técnica de estabilização química. As misturas de cinzas e ativador alcalino foram otimizadas de forma a introduzir a menor quantidade possível de ativador (componente mais caro), de forma a reduzir o custo do tratamento, garantindo ainda a necessária resistência à liquefação. A mistura AA1 (mais pobre), com uma concentração de hidróxido de sódio de 3 molal e uma razão entre silicato de sódio e hidróxido de sódio de 0.25, não liquefez quando submetida ao ensaio triaxial e apresentou velocidade normalizada de propagação das ondas de corte (V_{S1}) da ordem dos 300 m/s, claramente superior ao valor máximo definido por Andrus e Stokoe (2000) e Andrus et al. (2003) relativamente à suscetibilidade à liquefação, para a ação sísmica prevista na zona de Coimbra.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho enquadra-se nas atividades de investigação das bolsas individuais SFRH/BPD/85863/2012 e SFRH/BPD/120470/2016, bem como do projeto de investigação LIQ2PROEARTH (PTDC/ECM-GEO/1780/2014) financiado pela FCT.

REFERÊNCIAS

- Andrus, R. D., e Stokoe II, K. H. (2000) - Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(11), 1015-1025.
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., Chung, R. M. e Juang, C. H. (2003) - Guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures. NIST GCR, 03-854.
- Bray, J.D., Markham, C.S. e Cubrinovski, M. (2017) - Liquefaction assessments at shallow foundation building sites in the Central Business District of Christchurch, New Zealand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 92(C):153-164, DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.09.049.
- Castro, J. (2015) - Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- CEN (2010) - Eurocódigo 8. Projeto de estruturas para resistência aos sismos.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A. e Van Deventer, J. S. J. (2007) - Geopolymer technology: the current state of the art. *J Mater Sci*, Vol. 42, pp 2917-2933.
- Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Kiureghian, A., Tanaka, Y. e Tokimatsu K (2013) - Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 139, Nº 3, pp.407-419.
- Kramer, S. L. (1996) - *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 1 edition, ISBN: 0133749436.
- Lade, P. V. e Yamamuro, J. A. (1997) - Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical J.*, Vol. 34 pp 918-928, NRC, Canada.
- Matos Fernandes, M. (2011) - *Mecânica dos Solos – Conceitos e Princípios fundamentais*. FEUP edições, Porto.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. e Blanco, M. T. (1999) - Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp 1323-1329.

- Rocha, J. M. M. d. (2010) - Definição de Condições de Liquefação em Triaxial à Luz da Teoria dos Estados Críticos e Avaliação de Risco por Razão de Velocidades de Ondas Sísmicas numa Areia Dunar. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- Soares, S. M. (2014) - Evaluation of soil liquefaction potential based on laboratory data. Major factors and limit boundaries. Tese de Doutoramento. Universidade do Porto, Portugal.
- Teixeira, S. P. (2015) - Avaliação e modelação do comportamento de um solo arenoso face ao potencial de liquefação. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- Terzaghi, K. e Peck, R.B. (1987) - *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.
- Viana da Fonseca, A. e Ferreira, C. (2002) - Bender elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais. Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. e Fahey, M. (2009) - A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, Nº 2, pp. 1-17.
- Xu, H. e Van Deventer, J. S. J. (2000) - The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Int. J. Miner. Process*, Vol.59, pp 247-266.