

POTENCIAIS FONTES DE ERRO NA REALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE BENDER ELEMENTS EM AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS DE AREIA

POTENTIAL SOURCES OF ERROR IN BENDER ELEMENT TESTING OF RECONSTITUTED SAND SAMPLES

Pedro, António; *Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, amgpedro@dec.uc.pt*
Santos, Paulino; *Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, paulinosantos@gmail.com*
Araújo Santos, Luís; *ISEC, Coimbra, Portugal, lmsantos@uc.pt*
Coelho, Paulo; *Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, pac@dec.uc.pt*
Taborda, David M. G.; *Imperial College London, Londres, Reino Unido, d.taborda@imperial.ac.uk*

RESUMO

Neste artigo discutem-se quais as potenciais fontes de erro na realização e interpretação de ensaios de Bender Elements (BE) em amostras reconstituídas de areia. A questão é analisada segundo três vertentes, preparação da amostra, realização do ensaio e interpretação dos resultados, apresentando-se para cada uma destas as principais dificuldades encontradas, bem como a forma como foram ultrapassadas. Identificam-se aspetos críticos na preparação da amostra, como o controlo da densidade relativa e a saturação da amostra, propondo-se metodologias para os eliminar ou minimizar. Relativamente à realização do ensaio de BE, apresentam-se e discutem-se os principais fatores inerentes ao próprio ensaio que podem condicionar a sua execução. Seguidamente, aborda-se a complexidade associada à interpretação dos resultados, discutindo-se as vantagens e limitações dos métodos usualmente adotados. Por último, avalia-se a fiabilidade de todos os procedimentos adotados na preparação, realização e interpretação dos ensaios.

ABSTRACT

In this paper the principal sources of errors in the execution and interpretation of Bender Elements (BE) tests performed on reconstituted sand samples are discussed. The thematic is analysed according to three perspectives: sample preparation, execution of the test and interpretation of the results, and for each of these the main difficulties and potential solutions are presented. With regard to the sample preparation, critical aspects such as the control of the relative density and the saturation of the sample are identified and procedures to eliminate or mitigate their impact are proposed. Concerning the execution of the BE test, the main inherent factors that can affect their accuracy are presented and discussed. Subsequently, the complexity associated to the interpretation of the results is addressed and the advantages and limitations of the current methods employed are discussed. Finally, the reliability of all the procedures adopted in the preparation, execution and interpretation of the tests is evaluated.

1 - INTRODUÇÃO

Em investigação laboratorial, a utilização de amostras intactas de qualidade constitui, provavelmente, o fator mais importante quando se pretende analisar o comportamento de solos. Contudo, no caso de materiais arenosos a recolha de amostras intactas é muito dispendiosa ou mesmo inexecutável, pelo que geralmente se procede à sua reconstituição através de uma técnica laboratorial. A escolha dessa técnica, bem como a sua calibração, é influenciada por diversos fatores que, se não forem adequadamente tidos em consideração, podem comprometer a representatividade da amostra (Araújo Santos, 2015). No entanto as dificuldades na realização de um ensaio não terminam com a preparação da amostra e estendem-se a outros aspetos como o funcionamento dos próprios equipamentos que se utilizam para o seu controlo. O utilizador, para além de assegurar a calibração apropriada de todos os instrumentos necessários, deve estar bem informado sobre todas as limitações inerentes ao próprio ensaio e de como pode intervir para que estas não comprometam a fiabilidade do mesmo. Um último aspeto passível de introduzir fontes de erro prende-se com a interpretação dos resultados obtidos. Este aspeto é altamente potenciado pelos fatores anteriores, embora por si só, no caso de ensaios complexos como os Bender Elements (BE), possa ser responsável por conclusões erradas acerca do comportamento de um solo.

Neste artigo analisam-se as potenciais fontes de erro e quais as possíveis medidas mitigadoras a adotar quando se realizam ensaios de BE em amostras reconstituídas de areia. O material utilizado neste estudo foi a areia de Coimbra, Lote I (Montante) e Lote II (Jusante), que se encontra a ser investigado no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra por diversos investigadores (Santos, 2009; Cunha, 2010; Coelho et al., 2013; Araújo Santos, 2015; Santos, 2015) ao abrigo de um projeto de investigação que procura caracterizar materiais suscetíveis à liquefação. Numa primeira fase, apresenta-se a descrição

detalhada das diversas etapas referentes à preparação das amostras, focando em especial a questão de como efetuar o controlo da densidade relativa pretendida para cada amostra bem como a influência que o processo de saturação pode ter nos resultados finais obtidos. Para estes dois aspetos são desenvolvidas, testadas e apresentadas metodologias que visam minimizar estas potenciais fontes de erro. Em seguida, são apresentados os equipamentos necessários à realização do ensaio, detalhando quais as limitações inerentes à utilização dos mesmos e como é possível atenuá-las e reduzir a sua influência. Por último, analisa-se a complexidade relacionada com a interpretação dos resultados do ensaio de BE, efetuando-se uma comparação entre a análise efetuada tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência e avaliando-se a fiabilidade de todos procedimentos adotados na preparação, realização e interpretação do ensaio.

2 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

2.1 - Procedimentos iniciais

Os depósitos aluvionares do Mondego no seu estado natural não garante a qualidade desejada para as amostras a utilizar nos diversos ensaios, nomeadamente pela reconhecida impossibilidade prática de recolher amostras intactas neste tipo de materiais. Desta forma, e para inclusivamente atenuar diversos problemas que pudessem surgir na elaboração de provetes com características similares que impossibilitassem análises comparativas entre os mesmos, as areias foram sujeito a um tratamento logo após a colheita. O procedimento inicial efetuado nos dois lotes de areia teve como base o trabalho efetuado por Santos (2009) e contempla três etapas (Figura 1): i) lavagem - para remoção de finos e alguma matéria orgânica existente; ii) secagem - para remover a água da areia; iii) peneiração (Norma E 196 (LNEC, 1966)) - seleção da fração granulométrica apropriada.

A fração da areia pretendida com vista a garantir a uniformidade da areia e evitar problemas de segregação (Santos, 2009) implica a exclusão de todas as partículas retidas no peneiro n.º 40 (#0,425mm) bem como todas as que passaram no peneiro n.º 100 (#0,15mm) da série ASTM (2006). Na Figura 1c) apresentam-se as curvas granulométricas obtidas para os dois lotes podendo observar-se, tal como expectável, e devido ao tratamento efetuado, que a areia é praticamente uniforme. Após este tratamento os dois lotes da areia de Coimbra foram submetidos a diversos ensaios laboratoriais de caracterização. No Quadro 1 apresentam-se os parâmetros físicos determinados por Santos (2009) e por Araújo Santos (2015) que se consideram mais relevantes deste material para o estudo em análise.

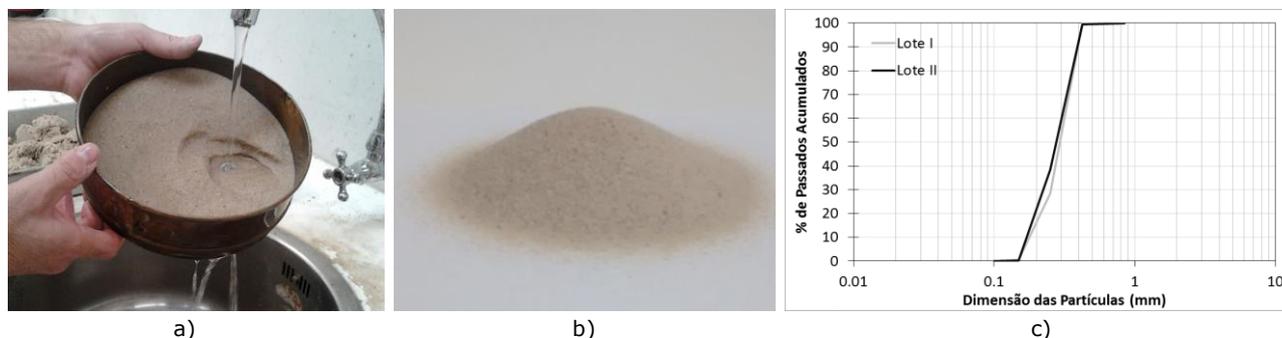


Figura 1 – Tratamento prévio das areias: a) lavagem; b) secagem; c) peneiração (curvas granulométricas)

Quadro 1 – Parâmetros físicos da areia de Coimbra (Santos, 2009; Araújo Santos, 2015)

Areia	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	e _{mín}	e _{máx}	γ _{d,mín} (kN/m ³)	γ _{d,máx} (kN/m ³)	G
Lote I	0,18	0,27	0,34	1,88	1,00	0,48	0,81	14,4	17,6	2,65
Lote II	0,18	0,29	0,32	1,78	0,95	0,55	0,96	13,2	16,7	2,64

2.2 - Técnica de preparação de amostras

Quando se procura caracterizar materiais de matriz arenosa, as dificuldades são acrescidas atendendo à complexidade e custos associados à recolha de amostras intactas. Por esse motivo foram desenvolvidas diversas técnicas (Figura 2) que procuram simular o mais fidedignamente possível as condições naturais do processo de deposição in-situ deste tipo de depósitos (Tatsuoka et al., 1979), sendo que a qualidade destas é aferida através da comparação entre a estrutura original do solo e a do provete reconstituído (Serra et al., 1997). Segundo Butterfield & Andrawes (1970) as técnicas de reconstituição de amostras de areia podem dividir-se em dois grandes grupos:

- Técnicas em que a densidade relativa é ajustada após a deposição da areia como, por exemplo, os métodos de vibração e de compactação seca e húmida;

- Métodos em que a densidade relativa é ajustada durante o processo de deposição, como os métodos de deposição gravítica ou métodos de chuva de areia (quer em meio seco quer em meio húmido) e os métodos de espalhamento.

De entre as várias técnicas de preparação de amostras, o método de chuva de areia, usualmente designado como método de pluviação, é considerado por Vaid & Negussey (1988) como sendo o que melhor aproxima o processo de deposição natural de areias, sendo capaz de reproduzir aspetos como a estrutura de solos de origem aluvionar, como é o caso da areia de Coimbra, sendo por isso adequado para o estudo do comportamento de areias naturais. Conforme demonstrado por Mahmood et al. (1976) e por Mullis et al. (1977) as amostras preparadas por esta técnica têm ainda a vantagem de não tenderem a apresentar qualquer tipo de orientação preferencial dos grãos independentemente da densidade relativa utilizada, originando desta forma amostras mais uniformes ao longo de toda a altura do provete. Tendo por base o exposto, optou-se por utilizar neste estudo o método de pluviação em detrimento dos métodos onde a densidade relativa é somente ajustada após a deposição da areia com os quais é manifestamente mais complexo controlar a uniformidade do processo de vibração e/ou compactação.

Na técnica de pluviação existem essencialmente quatro fatores que é necessário ter em consideração para proceder a uma preparação adequada: i) o meio de deposição; ii) a altura de queda; iii) o fluxo de deposição e; iv) o modo de deposição (Serra et al., 1997). Geralmente o meio mais usual de deposição é o ar, sendo também possível realizar a deposição em meio aquoso, embora neste meio, a menos que se combine com outra técnica, tal como vibração (Serra et al., 1997), só seja possível obter provetes de baixa densidade relativa (Vaid & Negussey, 1984). Outro fator prende-se naturalmente com a altura de queda das partículas, ou seja, com a sua velocidade de deposição e, conseqüentemente, com a energia cinética aquando do seu embate no fundo de deposição. Este fator influencia a densidade relativa alcançada embora, segundo Vaid & Negussey (1984), a energia cinética só cresce com a altura de queda até valores de 70 cm, sendo praticamente constante para valores superiores. Caso a deposição seja feita em meio aquoso, a máxima energia é atingida para uma altura de queda de 0,2cm, o que justifica as baixas densidades anteriormente referidas. Outro aspeto a ter em consideração prende-se com a distância entre o sistema de pluviação e o provete. Esta distância pode ser variável ou fixa (Serra et al., 1997), sendo que que nesta última possibilidade é difícil garantir a uniformidade em altura da amostra. O terceiro fator encontra-se relacionado com o fluxo de deposição. Genericamente este é definido como sendo a massa que preenche, por unidade de tempo, um volume definido por uma superfície horizontal da área unitária e por uma geratriz vertical que percorra a sua fronteira (Serra et al., 1997). O fluxo é controlado pelo número e pela área dos furos existentes no mecanismo de deposição, tendo sido verificado por Okamoto & Fityus (2006) que existe uma tendência para maiores fluxos com menos e maiores furos do que com uma maior quantidade de furos mais pequenos. Estudos efetuados demonstram que a densidade relativa aumenta com a diminuição do fluxo de deposição. Por último, o processo é afetado pela uniformidade da deposição que influencia a estrutura da amostra e a sua densidade relativa. Frequentemente, são utilizados vários peneiros empilhados para garantir um espalhamento uniforme da areia. O sucesso desta técnica é fortemente condicionado pela uniformidade da areia utilizada, uma vez que solos de granulometria extensa têm tendência para exibir segregação de partículas, razão pela qual se optou pela uniformização inicial da areia de Coimbra. Avaliadas as diferentes possibilidades optou-se por proceder à deposição ao ar da areia sendo os restantes fatores, altura de queda, número e área dos furos do sistema, calibrados em função das densidades relativas que se pretendia analisar.

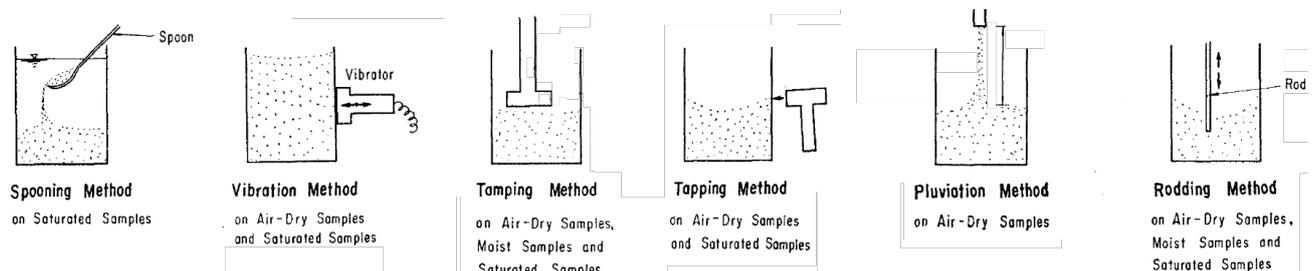


Figura 2 – Diversas técnicas de preparação de amostras de areia (adaptado de Tatsuoaka et al.,1979)

2.3 - Controlo da densidade relativa

A avaliação da densidade relativa baseia-se nos valores de índice de vazios máximo, $e_{máx}$, mínimo, $e_{mín}$, e atual, e_0 , das areias de acordo com a expressão [1]. A avaliação dos valores extremos do índice de vazios foi efetuada seguindo os princípios estipulados pelas normas D 4253 e D 4254 da ASTM (2000a; 2000b) adaptados às condições existentes no Laboratório de Geotecnia do DEC-FCTUC e às características das areias em estudo (Araújo Santos, 2015). O índice de vazios atual da areia foi determinado indiretamente através da utilização da expressão de índices físicos [2], que, a partir do conhecimento do peso, P , e do volume, V , de uma amostra de areia seca, relaciona o seu peso volúmico seco, γ_d , (expressão [3]) com a densidade das partículas sólidas da areia, G .

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e_0}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \times 100 [\%] \quad [1]$$

$$e = \frac{G \times 9,81}{\gamma_d} - 1 \quad [2]$$

$$\gamma_d = \frac{P}{V} [kN/m^3] \quad [3]$$

A utilização de uma metodologia de preparação que permita o controlo da densidade relativa   um aspeto fulcral quando se pretende ensaiar amostras reconstituídas de areia. O método deve ser robusto por forma a garantir amostras similares, mas o mais simples possível por forma a ser facilmente aplicado em diversas situações e para diversos tipos de dimensões de provetes. Na bibliografia não existe nenhuma norma pré-estabelecida que indique como preparar amostras com as densidades pretendidas pelo que foi necessário desenvolver um método capaz de as reproduzir com alguma fiabilidade para efetuar os ensaios corretamente.

Seguindo um procedimento similar ao adotado por Araújo Santos (2015), foi utilizada a parte superior de uma garrafa de plástico como sistema pluviador (Figura 3). A areia era colocada no interior da garrafa e a sua saída era efetuada através do gargalo podendo ser controlada em função do número de furos executados nas tampas (Figura 3). Neste estudo foram consideradas as densidades alvo de 40% e 80% para a areia de Coimbra – Lote I e de 40% e 70% para a areia de Coimbra – Lote II, dando desta forma dando continuidade ao trabalho de caracterização neste material desenvolvido no laboratório do DEC-FCTUC (Santos, 2009; Cunha, 2010; Araújo Santos, 2015). Para calibrar o processo, em particular a distância de queda e os furos nas tampas, foram efetuados diversos ensaios nos quais se deixou cair a areia para um molde com dimensões similares às da amostra pretendida (76mm de altura e diâmetro de 38mm) (Figura 3). Depois de cheio, rasou-se o molde cuidadosamente com uma espátula para não induzir vibrações que densificassem a amostra contida no molde e, por fim, limpou-se a área envolvente e procedeu-se   sua pesagem. Conhecido o valor da massa de areia e o volume do cilindro pode determinar-se o peso específico seco da areia, pela expressão [3], e conseqüentemente o seu  ndice de vazios atual (expressão [2]). Uma vez conhecidos os limites máximo e mínimo que o  ndice de vazios das areias em estudo podia assumir (Quadro 1) foi possível estimar qual a densidade relativa através da equação [1]. No caso da areia de Coimbra do Lote I não foi possível somente com esta técnica encontrar um diâmetro suficientemente pequeno de furos para garantir a densidade relativa de 80%. Assim, para contornar esta dificuldade fez-se uso da tampa relativa à densidade de 40% e colocou-se um peneiro n.  8 da série ASTM (2006) entre o pluviador e o molde, conseguindo-se desta forma a densidade pretendida.

Após a exaustiva repetição deste procedimento foram obtidos os valores de diâmetros de furos e de altura de queda para as areias apresentados no Quadro 2. Naturalmente, como se ilustra no Quadro 3 para 5 das últimas repetições efetuadas para o caso da areia de Coimbra – Lote I, os valores das densidades relativas obtidos em todas as tentativas não são exatamente coincidentes com os valores requeridos. Contudo, atendendo a que o método de pluviação desenvolvido é manual e não mecânico   inevitável que essas pequenas diferenças surjam por imprecisão do manuseador, podendo-se constatar porém que as discrepâncias são reduzidas ao ponto de se poder considerar o método como sendo viável e reproduzível de amostras com idênticas características.



Figura 3 – Pluviador, molde e tampas utilizadas para as diferentes densidades

Quadro 2 – Dimensões obtidas no final do método de pluviação para as densidades requeridas

Areia	D_r (%)	h_{queda} (cm)	\varnothing_{furo} (mm)	n� furos
Lote I	40	5	3,0	9
Lote II	40	4	3,5	9
	70	4	2,5	9

Quadro 3 – Resultados das densidades obtidas no final do processo de calibração do método de pluviação

		Densidade Requerida = 40%				Densidade Requerida = 80%				
	#	m (g)	γ_d (kN/m ³)	e ()	D _r (%)	#	m (g)	γ_d (kN/m ³)	e ()	D _r (%)
Lote I	1	138,33	15,73	0,659	44,8	1	150,01	17,06	0,530	84,4
	2	137,22	15,60	0,672	40,7	2	148,70	16,91	0,543	80,2
	3	136,85	15,56	0,677	39,3	3	150,45	17,11	0,525	85,7
	4	137,65	15,65	0,667	42,3	4	150,01	17,06	0,530	84,4
	5	137,14	15,59	0,673	40,4	5	149,38	16,99	0,536	82,4

2.4 - Montagem das amostras no aparelho triaxial

Tal como para o procedimento da pluviação de areias, não existe uma norma que indique o procedimento a seguir para a preparação de amostras. Desta forma o procedimento efetuado foi aperfeiçoado tendo por base a experiência adquirida com a realização de testes piloto e os conselhos dados por outros investigadores. O primeiro passo efetuado consistiu na limpeza do equipamento de forma a remover quaisquer detritos que prejudicassem o funcionamento do aparelho triaxial. Dado que o funcionamento deste é hidráulico teve-se igualmente o cuidado de saturar o sistema para que ar contido não prejudicasse o controlo de pressões.

Finda a limpeza e verificação da saturação das linhas seguiu-se a preparação do provete. Primeiro foi colocada a pedra porosa na base e uma membrana de látex fixa à mesma por o-rings. Para efetuar a pluviação de forma a criar um provete cilíndrico recorreu-se a um molde metálico tripartido ao qual foi aplicada sucção para garantir que a membrana estava completamente encostada a este, como é visível na Figura 4a). Seguidamente procedeu-se à pluviação da areia para dentro do molde, utilizando a tampa com os furos e a altura de queda apropriados à densidade relativa da amostra que se pretendia preparar (Figura 4b)). Um aspeto crucial na montagem das amostras e na qualidade dos resultados surge na fase seguinte, quando se efetua a colocação do topo metálico que suporta o BE e que isola a amostra. Devido aos constrangimentos existentes, nomeadamente a ausência de espaço para colocação da pedra porosa superior, a amostra não pode ser simplesmente rasada. Contudo, é necessário alisar a superfície superior da amostra e garantir um contacto perfeito entre BE e a areia por forma a não existirem interferências na transmissão do sinal. Este procedimento foi efetuado com extremo cuidado pois qualquer movimento inesperado iria imediatamente causar uma perturbação e conseqüente densificação das amostras, particularmente as preparadas com menores densidades relativas, inviabilizando assim o ensaio. Após a colocação dos o-rings no topo, foi aplicada, com uma bomba de vácuo, uma sucção no topo da amostra de cerca de 7kPa, com o intuito de manter o provete com a forma e condições pretendidas e assim permitir a remoção do molde tripartido conforme se pode observar na Figura 4c). Foi então colocada a campânula do aparelho triaxial tendo-se em seguida selado e enchido a câmara com água e aplicada uma pressão total de cerca de 15kPa na amostra (o que correspondia a uma pressão efetiva de aproximadamente 22kPa).



Figura 4 – Etapas seguidas na preparação de amostras: a) membrana ajustada ao molde tripartido; b) amostra de areia no molde após pluviação; c) amostra de areia preparada; d) saturação através de percolação ascendente

2.5 - Saturação dos provetes

A última etapa antes do início do ensaio propriamente dito consiste na saturação da amostra. Esta é provavelmente a etapa mais crítica de todo o processo uma vez que a introdução de água pode originar perturbações na amostra. Inicialmente o procedimento adotado (M1) para esta fase consistiu no seguinte:

i) Percolação ascendente de água entre a base e o topo da amostra a baixas pressões (15kPa na câmara). O diferencial de pressão adotado era de aproximadamente 10kPa, estabelecido tendo por base a sucção aplicada no topo (cerca de 7kPa) e uma pressão imposta na base de cerca de 3kPa (Figura 4d)). Este processo foi realizado até se percolar uma quantidade considerável de água (aproximadamente 150cm³) e tinha como intuito remover o ar existente na amostra.

ii) Posteriormente, a sucção no topo foi retirada (pressão igual a zero) tendo-se mantido o procedimento de percolar água pela amostra, embora neste caso somente com um diferencial de pressão de 3kPa entre a base e o topo. Este procedimento permitiu remover de forma controlada o sistema de sucção montado no topo da amostra utilizado na sua preparação e saturação.

iii) Após algumas passagens de água elevaram-se as pressões na célula e no interior do provete até se atingirem os valores de 215kPa na célula e 200kPa e 197kPa na base e no topo da amostra, respetivamente. Esta subida de pressões foi efetuada de modo controlado, garantido sempre uma tensão efetiva constante de 12 a 15kPa no provete. A vantagem da percolação de água a este nível mais elevado de pressões é possibilitar de forma mais rápida a remoção de quaisquer bolhas de ar ainda existentes na amostra.

iv) O grau de saturação foi avaliado após estabilização de pressões no exterior e interior da amostra (ausência de percolação e tensão efetiva de 15kPa), através do parâmetro B de Skempton (1954), tendo-se considerado que a amostra se encontrava saturada e prosseguido com o ensaio quando este parâmetro apresentava um valor igual ou superior 0,98 (o valor de 1 indica saturação plena).

Apesar de todo o cuidado para perturbar a amostra o menos possível verificou-se que a percolação a que a amostra se encontrava sujeita no passo i) (percolação com diferencial de 10kPa a baixas pressões) era provavelmente muito elevada e causava alguma densificação e alteração das características pretendidas para o ensaio. Tal facto é claramente visível quando se compararam os resultados dos ensaios realizados com este procedimento (M1), verificando-se que as amostras mais soltas (40) exibem uma rigidez mais próxima da rigidez das preparadas com maior densidade relativa (70 e 80) (Figura 5). Tal sucede independentemente do nível de tensão na amostra e é particularmente evidente no Lote II. Face aos resultados obtidos optou-se por utilizar um novo procedimento de saturação (M2) que era idêntico ao inicial com a exceção de não se efetuar o passo i), e iniciar o procedimento no passo ii) com a remoção da sucção. Os resultados obtidos com este novo procedimento (M2) estão sobrepostos na Figura 5, podendo constatar-se que existem algumas diferenças, com as amostras mais soltas a apresentarem uma rigidez cerca de 5 a 10% inferiores. Por sua vez, como seria de esperar, as amostras mais densas praticamente não exibem grande sensibilidade ao método, já que estas amostras já se encontram inicialmente bastante densificadas. Com base nestes resultados elegeram-se o segundo procedimento (M2) como sendo o mais adequado e realizaram-se os restantes ensaios seguindo esta metodologia para a saturação das amostras.

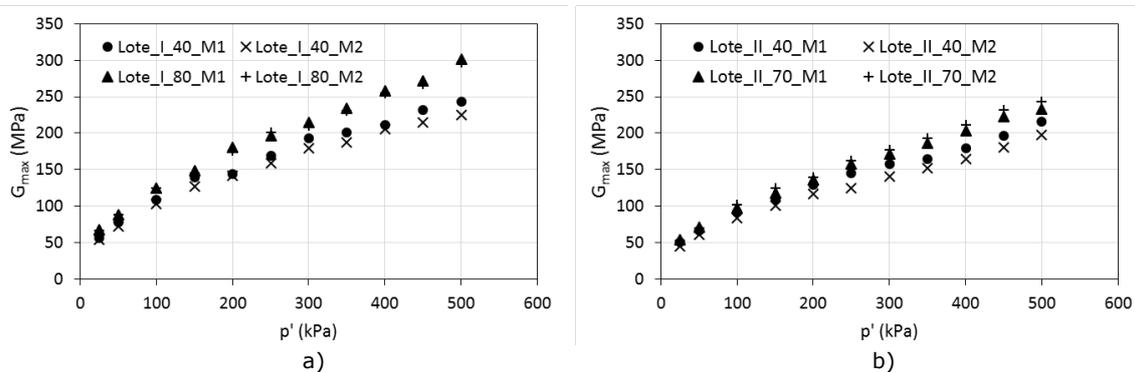


Figura 5 – Influência na rigidez máxima originada pelo processo de saturação utilizado: a) Lote I; b) Lote II

3 - REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

3.1 - Equipamentos

A realização de ensaios de BE implica a utilização de diversos tipos de equipamentos. No caso do Laboratório de Geotecnia do DEC-FCTUC os BE encontram-se incorporados no pedestal e na peça de topo (Figura 6a)) de uma célula de trajetórias de tensões triaxial. Para além de todos os equipamentos auxiliares ao controlo de uma célula triaxial (Figura 6b)), a realização deste tipo de ensaio requer a utilização de um gerador de ondas e de um osciloscópio. Para emitir o sinal foi utilizado o gerador de ondas TTI TG1010 (Figura 6c)) enquanto para a leitura dos sinais, emitido e recebido, foi utilizado o osciloscópio Tektronix TDS220 (Figura 6d)). Os sinais registados pelo osciloscópio foram depois transferidos para um computador onde o programa WaveStar™ processa os dados de forma a poderem ser tratados e analisados. Além dos equipamentos anteriores foi utilizado um controlador de pressão externo, ligado ao topo da amostra, que permitiu a aplicação da sucção na amostra durante a fase de montagem.

A utilização incorreta (mesmo que inadvertidamente) de qualquer equipamento laboratorial é passível de originar não uniformidades nas amostras ou erros de leitura. No caso da realização de ensaios triaxiais e de BE, este problema assume um papel fundamental dado que a complexidade e diversidade de instrumentos de controlo necessários ao ensaio podem facilmente comprometer a fiabilidade dos ensaios

(Coelho, 2000). Neste caso, foi necessário utilizar cinco instrumentos para controlar o ensaio. As pressões foram registadas por dois transdutores de pressão, um na célula e outro na amostra (que dependendo da sua utilização podia medir a pressão no topo e na base da amostra). O deslocamento vertical do êmbolo, e consequentemente da amostra, foi registado por um defletómetro externo e a variação de volume da amostra foi lida com recurso a um medidor volumétrico. As características de todos estes instrumentos encontram-se no Quadro 4 tendo os transdutores de pressão capacidade para 1000kPa, o de deslocamento um curso máximo de 25mm e o medidor volumétrico capacidade de 50cm³. No Quadro 4 apresentam-se igualmente os fatores de calibração determinados para cada um dos instrumentos utilizados. Em todos eles verificou-se uma correlação linear, praticamente exata, entre as unidades de aquisição (voltagem) e as unidades de medição, indiciando um funcionamento correto e adequado de todos os instrumentos.

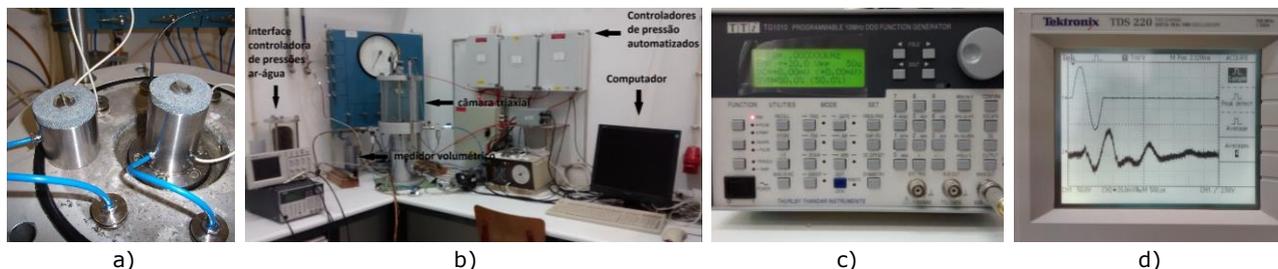


Figura 6 – Equipamentos utilizados: a) BE montados no aparelho triaxial; b) Célula triaxial e restantes equipamentos auxiliares; c) Gerador de ondas Tti-TG1010; d) Osciloscópio Tektronix TDS220

Quadro 4 – Características da instrumentação existente no equipamento triaxial

Instrumento	Capacidade	Resolução	Unidade	Voltagem	Fator de calibração [#]	R ²
Transdutor pressão da célula	1000	0,0300	kPa	μV	-0,01750 kPa/μV	0.9999
Transdutor pressão na amostra	1000	0,0300	kPa	μV	0,01750 kPa/μV	0.9999
Transdutor de deslocamento	25	0,0002	mm	μV	-0,00070 mm/μV	1.0000
Medidor volumétrico	50	0,0010	cm ³	μV	0,00120 cm ³ /μV	0.9997

Legenda: # - calibrações efetuadas por Azeiteiro (2016)

3.2 - Bender Elements

A utilização de BE para a determinação da rigidez inicial (Dyvik & Madshus, 1985) tem conquistado um lugar de destaque devido, não só à relativa simplicidade de execução e custo reduzido, mas também graças à obtenção praticamente direta do G_{max} . Outra grande vantagem que este equipamento possui é que, dada a sua simplicidade e reduzido tamanho, pode ser instalado, como é o caso do presente estudo, em células triaxiais comuns, o que permite estudar de uma forma simples diversos efeitos como, por exemplo, a influência da pressão de confinamento aplicada às amostras. O princípio do ensaio baseia-se na determinação da velocidade de propagação da onda de corte, V_s . Para tal, recorrendo a um gerador de ondas, faz-se percorrer pelo provete uma onda de corte transmitida pelo emissor, geralmente colocado no topo, e recebida pelo recetor, usualmente colocado no pedestal. Como os BE estão ligados a um osciloscópio é possível registar tanto o sinal emitido como o recebido. Desse registo pode determinar-se o tempo, t , que a onda leva a percorrer o provete entre a emissão e receção e, conhecendo o comprimento L da amostra, a velocidade da onda de corte, que pode ser obtida pela equação [4]. Sabendo a densidade do solo, o valor de G_{max} pode ser facilmente obtido através da equação [5].

$$V_s = \frac{L}{t} [m/s] \quad [4]$$

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 [MPa] \quad [5]$$

Os BE são basicamente transdutores piezoelétricos cerâmicos, onde duas finas placas cerâmicas se encontram ligadas a um corpo central metálico e a elétrodos (Ferreira, 2008). Dyvik & Madshus (1985) verificaram que um bom desempenho da transmissão de ondas de corte dependia da forma como os transdutores se encontravam polarizados. Esse mesmo estudo revelou que ligações em série são mais convenientes para os emissores, visto existir uma maior amplificação resultante para o mesmo sinal emitido. Por outro lado as ligações em paralelo provam-se mais eficazes para o recetor de ondas, onde o mesmo sinal origina um deslocamento maior. No presente estudo optou-se por seguir as recomendações propostas por Dyvik & Madshus (1985) na polarização do BE emissor e recetor.

Apesar das inúmeras vantagens que os BE oferecem, este tipo de ensaios não se encontra livre de problemas inerentes quer ao seu funcionamento quer à análise e interpretação de resultados. Uma das questões que suscita habitualmente alguma controvérsia tem que ver com a determinação da distância

entre BE percorrida pela onda. Segundo os resultados publicados por diversos autores (Dyvik & Madshus, 1985; Viggiani & Atkinson, 1995), a distância de ponta a ponta é aquela que proporciona maior precisão, pelo que foi esta a distância assumida para a determinação da velocidade da onda neste trabalho, embora se deva referir que existam outros autores que propõem a adoção de outras distâncias (Rio, 2006; Sadek, 2006). Importa também mencionar que sendo a dimensão dos provetes pequena, a medição adequada dessa distância assume um papel fundamental, pelo que é necessário proceder à sua correção ao longo do ensaio.

Contudo, a principal dificuldade na utilização de BE prende-se usualmente com a determinação do tempo de chegada da onda emitida uma vez que a deteção desta nem sempre é fácil devido a múltiplos fatores. Um dos principais é o chamado "near-field effect". Sánchez-Salineró et al. (1986) realizou diversos ensaios tendo verificado que aquando da transmissão da onda de corte (S) ondas de compressão (P) eram igualmente geradas. Estas, embora de menor amplitude, percorrem mais depressa o provete e como tal são captadas primeiro no recetor, interferindo com o sinal emitido. Estas interferências, caracterizadas geralmente por pequenas deflexões existentes no sinal recebido imediatamente antes da chegada da onda de corte, tornam complexa a avaliação do tempo real que a onda S demora a percorrer a amostra. Outro fator importante e suscetível de gerar dificuldades na interpretação dos resultados dos ensaios está relacionado com a geometria da amostra e com as suas fronteiras. Estas podem originar reflexões no caso de serem pouco flexíveis como é o caso do topo e da base do provete (Arulnathan et al., 1998).

Ainda neste contexto, importa referir outros dois aspetos que na ótica dos autores são de elevada importância e não devem ser ignorados. Um deles prende-se com o alinhamento entre BE que deve ser assegurado durante a montagem das amostras para que daí não advenham problemas relacionado com a receção do sinal. A ausência deste alinhamento pode inclusivamente, em casos extremos, tornar completamente impossível a análise dos resultados por via de um sinal totalmente distorcido ou inexistente. O outro fator está relacionado com o ruído eletromagnético gerado pelos diversos equipamentos em funcionamento. Este ruído, que atenua e distorce o sinal recebido, é em grande parte praticamente impossível de suprimir uma vez que são os próprios equipamentos necessários para a realização do ensaio que o geram. Contudo, algumas medidas de minimização deste fator podem passar pela utilização de cabos blindados ligados à terra e com um comprimento não maior do que o estritamente necessário para efetuar a ligação entre equipamentos (Lee & Santamarina, 2005), aspeto que foi tido em consideração neste trabalho com a utilização de cabos curtos e de dupla blindagem. Outra medida para atenuar o ruído pode passar pela filtragem do sinal recebido (Alvarado, 2007), embora nesse caso seja necessário especial cuidado para não eliminar informação relevante que possa ser fundamental na avaliação de resultados.

3.3 - Sinal emitido

Naturalmente que a escolha de um adequado sinal emitido é preponderante para facilitar a deteção da onda de corte. Na bibliografia encontram-se publicados diversos estudos relativamente a qual o tipo e a forma do sinal que deve ser emitido, embora não seja possível concluir ao certo qual o mais adequado (Ferreira, 2008). Não obstante, estudos efetuados (Dyvik & Madshus, 1985; Rio, 2006) revelam que existe uma incerteza quanto à resposta dada pelos BE para ondas quadráticas, "square signal", tornando muito mais difícil efetuar comparações entre o sinal recebido e o emitido. Por outro lado, o sinal sinusoidal individual centrado, "sine wave", é acolhido com muito maior entusiasmo dentro da comunidade científica, uma vez que, dada a sua forma, a comparação entre o sinal recebido e emitido se torna mais óbvia, resultando numa análise mais objetiva e com resultados mais fiáveis (Ferreira, 2008). Teoricamente a frequência do sinal emitido não deveria afetar a velocidade de propagação da onda, contudo, na prática, verifica-se que existe alguma interferência (Alvarado, 2007), pelo que é usual emitir ondas com diferentes frequências entre 1 e 10 kHz, com o intuito de avaliar este aspeto e ao mesmo tempo para reunir mais informação que pode ser útil na interpretação da resposta. Pelas razões expostas acima, optou-se neste trabalho por utilizar ondas individuais centradas do tipo sinusoidal com frequências de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 10kHz conforme se pode ver na Figura 7.

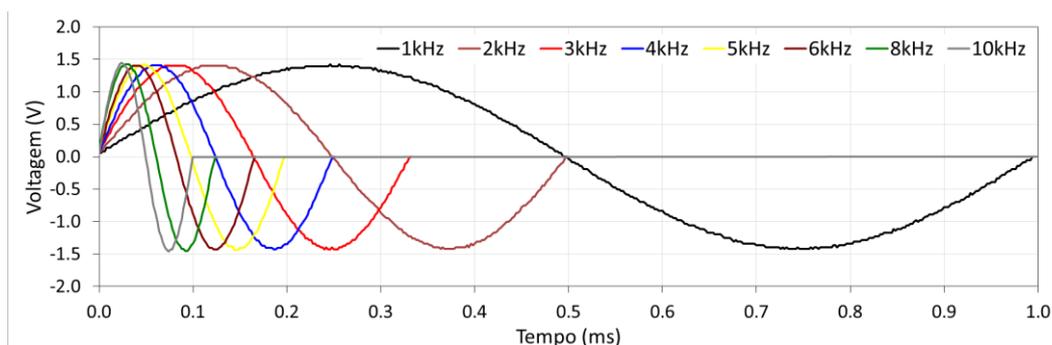


Figura 7 – Sinais sinusoidais individuais centrados emitidos

3.4 - Atraso na resposta do sistema

Outro aspecto que não pode ser descurado no ensaio prende-se com o efeito do atraso na resposta do sistema (Pedro, 2013). Teoricamente, quando os BE da base e do topo se encontram perfeitamente encostados (distância nula) a leitura do sinal recebido deveria acontecer exatamente no mesmo instante em que o sinal é emitido, havendo desta forma uma continuidade perfeita na transmissão do sinal. Contudo, tal geralmente não é observado, verificando-se que existe um pequeno atraso na receção do sinal. Este atraso na resposta deve-se ao próprio sistema de ensaio e é impossível de anular pelo que deve ser determinado e depois utilizado para retificar os resultados obtidos. Neste caso efetuaram-se testes para diferentes frequências, e com os BE alinhados a 0° e também a 180° , tendo-se verificado que existia um atraso na resposta de $15\mu\text{s}$.

4 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Conforme se referiu anteriormente, os ensaios de BE são relativamente simples de efetuar embora a interpretação de resultados possa ser bastante complexa e subjetiva. Com o objetivo de superar estas ambiguidades diversas metodologias foram apresentadas para a interpretação dos resultados, sendo que todas se enquadram em dois grandes grupos: análise no domínio do tempo (TD) e análise no domínio da frequência (FD). A interpretação no domínio do tempo é muito similar àquela que se efetua em ensaios de campo e consiste na observação direta do sinal recebido, avaliando o tempo de chegada da onda ao recetor (Viana da Fonseca et al., 2009). A interpretação no domínio da frequência implica uma transformação do sinal recebido, passando então a análise do domínio do tempo para o domínio da frequência. Recorrendo posteriormente a correlações entre o sinal de emitido e recebido é possível obter o tempo de propagação da onda de corte (Pedro, 2013).

4.1 - Análise no domínio do tempo (TD)

Na análise TD, a determinação da chegada da onda de corte é efetuada diretamente através da comparação visual entre o sinal emitido e o sinal recebido. Dadas as distintas características do sinal emitido este pode parecer ser um processo imediato e simples mas na realidade está envolto por alguma subjetividade devido a alguns dos fatores de distorção anteriormente referidos. A título de exemplo apresenta-se na Figura 8 o sinal recebido para as diferentes frequências analisadas (note-se que existe uma polarização de 180° em relação aos sinais emitidos (ver Figura 7)). À primeira vista, é fácil perceber por que razão a determinação da chegada da onda de corte é um processo subjetivo, uma vez que, devido ao ruído existente e aos outros fatores apontados, os sinais recebidos não são exatamente iguais aos sinais emitidos. Neste caso é até bem visível uma pequena deflexão do sinal nos instantes anteriores à chegada da onda de corte para algumas frequências utilizadas, o que sugere a presença de "near-field effects". Também se pode observar na figura que a inversão da onda não se dá em todas as frequências no mesmo instante de tempo, o que pressupõe que a velocidade de propagação também parece depender deste parâmetro. Mediante estes aspetos, considerar apenas um único instante para definir o tempo de chegada da onda de corte pode não ser o melhor procedimento, pelo que se considerou que o mais adequado passa, numa primeira fase, por estabelecer um intervalo comum a todas as frequências analisadas (assinalado pelas linhas tracejadas a preto) e, posteriormente, considerar que o tempo de chegada correspondia ao valor médio desse intervalo.

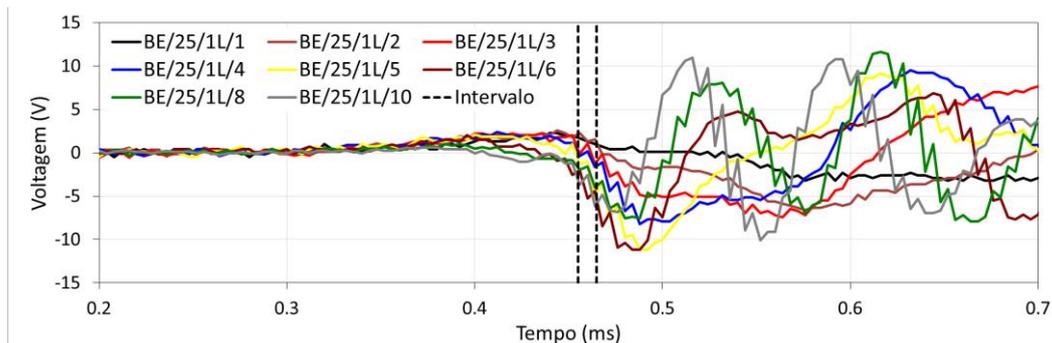


Figura 8 - Exemplo de sinal recebido para as diferentes frequências ensaiadas

4.2 - Análise no domínio da frequência (FD)

Na análise FD a determinação do tempo passa pelo uso de transformadas de Fourier que permitem correlacionar os sinais emitido e recebido num só (Alvarado, 2007). Dessa transformada, pode avaliar-se o fator de fase do sistema que pode ser relacionado com o tempo de chegada da onda de corte. Segundo Alvarado (2007), para um sistema ideal de BE, em que as velocidades de propagação das ondas são independentes das frequências, o fator de fase referido seria representado por uma reta com um declive constante passando pela origem. Este; estaria diretamente relacionado com o tempo de chegada da onda

de corte, sendo que declives mais baixos correspondem a um tempo menor e, conseqüentemente, a uma velocidade maior e vice-versa. No entanto, este procedimento não está livre de problemas de interpretação que são devidos à impossibilidade de, por vezes, não se conseguir ter um declive constante. A Figura 9 mostra, a título de exemplo para o mesmo ensaio e para a mesma pressão média efetiva, os gráficos obtidos para o fator de fase acumulado correspondente às frequências de 3kHz e 10kHz. Como se pode ver na figura, o declive obtido para a frequência 3kHz é bem definido sendo possível determinar uma boa estimativa do tempo de chegada da onda de corte. No entanto, para a frequência de 10kHz verifica-se que o declive não se encontra bem definido pelo que a interpretação do tempo de chegada pode ser incorreta. Esta situação foi observada sistematicamente em quase todos os ensaios efetuados sendo que, para os níveis de tensão efetiva média mais elevados, muitas vezes não era possível obter um valor do tempo coerente com as outras frequências testadas. Apesar de ter sido efetuada a interpretação do ensaio por esta metodologia, a sua apreciação requereu grandes ajustes, pelo que não se considera que os resultados obtidos possam ser considerados os mais fiáveis e representativos.

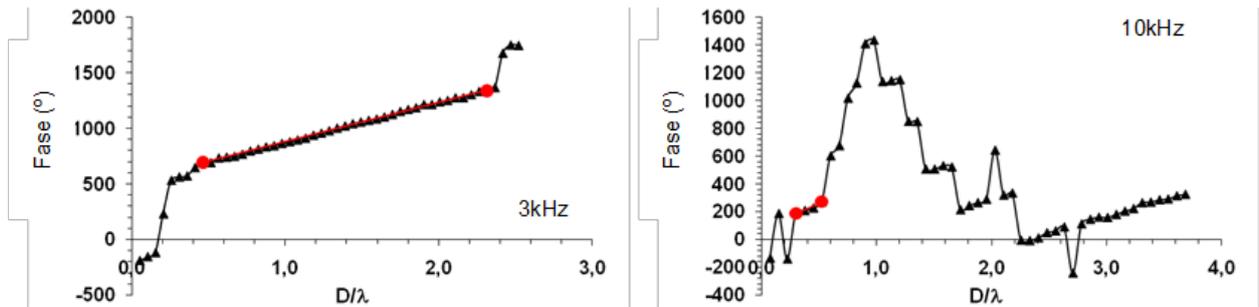


Figura 9 – Fator de fase obtido num ensaio para a mesma pressão média efetiva mas para diferentes frequências

4.3 - Influência da metodologia utilizada para a determinação do tempo de chegada

Apesar das diferenças existentes, as duas metodologias de interpretação deveriam fornecer resultados idênticos. No entanto estudos levados a cabo por Viana da Fonseca et al. (2009) e por Pedro (2013) mostram que o valor estimado para a velocidade da onda de corte é tendencialmente maior quando a interpretação é efetuada pelo domínio do tempo em comparação com os resultados obtidos pelo domínio da frequência. Idêntica conclusão foi observada neste estudo, conforme se pode constatar pela análise da Figura 10, onde estão ilustrados os valores da rigidez máxima obtida em quatro ensaios de BE, dois em cada Lote, efetuados para a areia de Coimbra. Em todos os casos analisados, verificou-se que, independentemente do lote, da densidade relativa e do estado de tensão, os valores de rigidez obtidos com a análise FD eram inferiores aos obtidos na análise TD, com as discrepâncias entre metodologias a ascenderem a mais de 20% do valor da rigidez máxima.

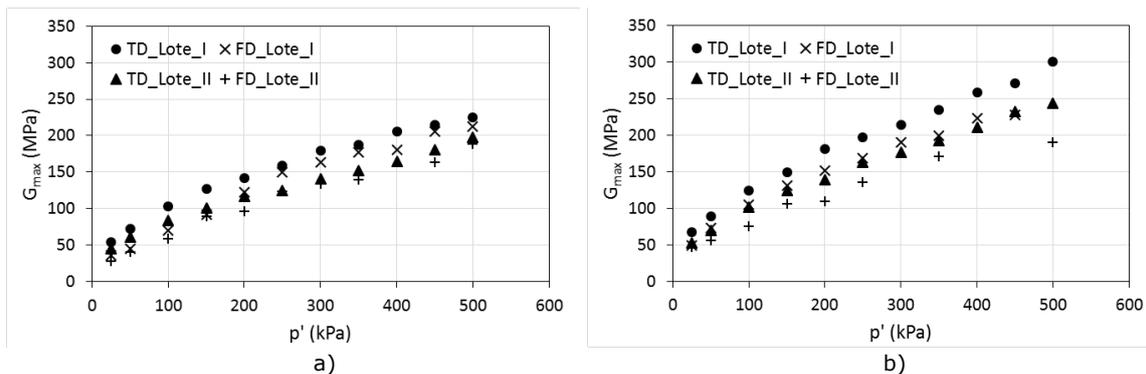


Figura 10 – Influência da metodologia utilizada para a determinação do tempo de chegada: a) $D_r=40\%$; b) $D_r=70$ e 80%

5 - FIABILIDADE DOS ENSAIOS EFETUADOS

Com o objetivo de validar o método de preparação das amostras e interpretação dos resultados, efetuaram-se dois ensaios em cada Lote de areia com as mesmas densidades relativas. Os resultados da rigidez máxima obtidos utilizando a análise TD para os dois lotes da areia de Coimbra estão ilustrados na Figura 11. A análise da figura permite aferir acerca da fiabilidade do procedimento desenvolvido para a preparação das amostras e da metodologia seguida na interpretação dos resultados, podendo confirmar-se que, salvo pequenas diferenças (inferiores a 5%), existe uma grande proximidade entre os valores dos ensaios, independentemente do lote e da densidade relativa utilizados. Com base no exposto, pode concluir-se que a metodologia empregue consegue replicar ensaios com grande precisão, mesmo tendo em conta as inevitáveis incertezas experimentais.

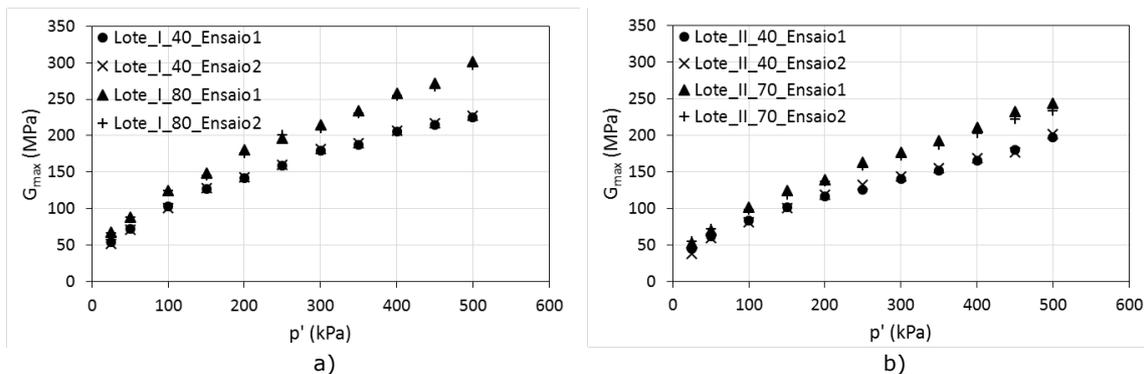


Figura 11 – Resultados dos dois ensaios efetuados com a mesma densidade relativa: a) Lote I; b) Lote II

6 - CONCLUSÕES

Com o trabalho realizado procurou-se contribuir para uma melhor perceção das potenciais fontes de erro na realização de ensaios de BE em amostras reconstituídas de areia. Para além da identificação das principais dificuldades inerentes à preparação de amostras, realização de ensaios e interpretação de resultados, procurou-se apresentar algumas soluções e estabelecer metodologias de modo a contornar e/ou ultrapassar essas questões, recorrendo ao caso concreto da avaliação da rigidez máxima da areia de Coimbra. Relativamente à preparação das amostras, após selecionar a técnica de reconstituição que apresentava maior robustez, desenvolveu-se um método de pluviação manual simples e eficaz que permitiu preparar amostras com a densidade relativa desejada de forma viável e reproduzível. A montagem da amostra no aparelho triaxial, particularmente no caso de amostras soltas, constitui outro desafio já que qualquer movimento imprevisto origina automaticamente a sua densificação, comprometendo definitivamente os resultados do ensaio. A esse respeito verificou-se igualmente que a percolação de água, embora seja essencial para a saturação da amostra, pode induzir alterações significativas na densidade de amostras soltas que, no caso em apreço, foram quantificadas como sendo superiores a 5%. No caso de amostras densas o efeito perturbador é menor (inferior a 2%) embora seja recomendável realizar a percolação sempre com baixos diferenciais de pressão (preferencialmente inferiores a 5kPa).

O controlo e representatividade do ensaio de BE depende do adequado funcionamento de todos os equipamentos e instrumentos envolvidos, tendo-se procedido à sua inspeção e calibração. Foram também identificados diversos aspetos inerentes à sua realização e que afetam a interpretação dos resultados. Apesar dos esforços realizados com a utilização de cablagem com blindagem dupla, verificou-se a existência de ruído eletromagnético, bem como sinais de "near-field-effects" que condicionaram e distorceram o sinal recebido. Com o intuito de facilitar a perceção deste, optou-se por emitir um sinal individual sinusoidal com diferentes frequências, tendo-se revelado uma metodologia adequada pois foi possível, com maior certeza, identificar o correto tempo de chegada da onda de corte. Outro aspeto tido em consideração no ensaio foi a correção relativa ao tempo de resposta do sistema, que se verificou ser, no caso do equipamento utilizado, de sensivelmente 15 μ s.

Devido ao ruído existente, a interpretação dos resultados torna-se complexa e consideravelmente subjetiva, especialmente quando é efetuada uma análise do tempo de chegada da onda no domínio do tempo. Para minimizar essas dificuldades, estabeleceu-se um procedimento que passou pela definição de um intervalo comum a todas as frequências analisadas e posterior adoção do valor médio desse intervalo como sendo o tempo de chegada da onda. A interpretação realizada no domínio da frequência revestiu-se de diversas dificuldades, sendo mesmo em alguns casos inexequível dada a qualidade dos resultados obtidos para algumas frequências. Ainda assim, a comparação possível entre as duas metodologias permitiu confirmar os resultados existentes na bibliografia, observando-se que a análise do domínio da frequência subestima a rigidez do material. No presente estudo, concluiu-se que essa discrepância era de cerca de 20% para o caso de amostras densas, observando-se uma menor diferença no caso de amostras soltas.

Por último, a validação da metodologia de preparação da amostra e de interpretação dos resultados foi aferida pela realização de dois testes preparados sob condições idênticas. Os resultados alcançados demonstraram diferenças entre os testes inferiores a 5% pelo que, considerando as inevitáveis incertezas experimentais, se pode concluir que a metodologia desenvolvida consegue replicar ensaios com grande precisão e alta fiabilidade.

REFERÊNCIAS

Alvarado, G. (2007) *Influence of late cementation on the behaviour of reservoir sands*. PhD thesis. Imperial College of London, London.

Araújo Santos, L. M. (2015) *Characterisation of the mechanical behaviour of Coimbra sand under*

- generalised loading conditions*. Universidade de Coimbra, Coimbra. (in Portuguese).
- Arulnathan, R., Boulanger, R. W. & Riemer, M. F. (1998) Analysis of bender element tests. *Geotechnical Testing Journal*, **21** (2), 120-131.
- ASTM (2000a), D 4253, *Standard test methods - Maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. USA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2000b), D 4254, *Standard test methods - Minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. USA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2006), D 2487, *Standard practice - Classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. USA, American Society for Testing and Materials.
- Azeiteiro, R. J. N. (2016) *Numerical simulation of liquefaction-related phenomena*. Universidade de Coimbra, Coimbra. (in development).
- Butterfield, R. & Andrawes, K. (1970) An air activated sand spreader for forming uniform sand beds. *Geotechnique*, **20** (1), 97-100.
- Coelho, P. A. L. F. (2000) *Geotechnical characterization of soft soils. Study of the experimental site of Quinta do Foja (Baixo Mondego)*. Master's thesis. Universidade de Coimbra, Coimbra. (in Portuguese).
- Coelho, P. A. L. F., Azeiteiro, R., Marques, V., Araújo Santos, L. M. & Taborda, D. M. G. (2013) Challenges to the laboratory evaluation of field liquefaction resistance. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*.
- Cunha, M. (2010) *Laboratorial characterisation of the behaviour of Coimbra sand under cycling loading*. Universidade de Coimbra, Coimbra. (in Portuguese).
- Dyvik, R. & Madshus, C. (1985) Lab Measurements of Gmax Using Bender Elements. In *Proceedings of the ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan*. 186-197.
- Ferreira, C. (2008) *The use of seismic wave velocities in the measurement of stiffness of a residual soil*. PhD thesis. Oporto University, Oporto.
- Lee, J. S. & Santamarina, J. C. (2005) Bender elements: Performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131** (9), 1063-1070.
- LNEC (1966), E 196, *Soils - Sieving*. Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (in Portuguese).
- Mahmood, A., Mitchell, J. & Lindblom, U. (1976) "Effect of specimen preparation method on grain arrangement and compressibility in sand" *Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*, ASTM International.
- Mulilis, J. P., Arulanandan, K., Mitchell, J. K., Chan, C. K. & Seed, H. B. (1977) Effects of sample preparation on sand liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **103** (2), 91-108.
- Okamoto, M. & Fityus, S. (2006) An evaluation of the dry pluviation preparation technique applied to silica sand samples. In *Proceedings of the Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*, Taylor and Francis, London, 33-34.
- Pedro, A. (2013) *Geotechnical investigation of Ivens shaft in Lisbon*. PhD Thesis. Imperial College London, London, UK.
- Rio, J. (2006) *Advances in Laboratory Geophysics Using Bender Elements*. PhD thesis. University College London, London.
- Sadek, T. (2006) *The multiaxial behaviour and elastic stiffness of Hostun sand*. University of Bristol.
- Sánchez-Salineró, I., Roesset, J. M. & Stokoe, K. H. (1986) *Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation*. Geotechnical Report No. GR86-15. Civil Engineering Department, University of Texas at Austin.
- Santos, L. N. L. (2009) *Behaviour of Coimbra sand under monotonic loading*. Universidade de Coimbra, Coimbra. (in Portuguese).
- Santos, P. (2015) *Characterisation of the initial shear stiffness of sands using bender elements*. MSc thesis. University of Coimbra, Coimbra. (in Portuguese).
- Serra, J. B., Madeira, L., Emílio, F. T. & Palma, J. (1997) Desenvolvimento e aplicação de um chuveiro de areia para a preparação de provetes em laboratório. In *Proceedings of the 6.º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa*. 231-240 (in Portuguese).
- Skempton, A. W. (1954) The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Géotechnique*, **4** (4), 143-147.
- Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S. & Sudo, H. (1979) Shear modulus and damping by drained tests on clean sand specimens reconstituted by various methods. *Soils and Foundations*, **19** (1), 39-54.
- Vaid, Y. & Negussey, D. (1988) "Preparation of reconstituted sand specimens" *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM International.
- Vaid, Y. P. & Negussey, D. (1984) Relative density of pluviated sand samples. *Soils and Foundations*, **24** (2), 101-105.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. & Fahey, M. (2009) A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal*, **32** (2), 91-107.
- Viggiani, G. & Atkinson, J. (1995) Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, **45** (1), 149-154.