

DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DE UMA AREIA COM RECURSO A BENDER ELEMENTS E ACELERÓMETROS: PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO E APLICAÇÕES

SMALL STRAIN STIFFNESS OF A SAND BY MEANS OF BENDER ELEMENTS AND ACCELEROMETERS: MEASURING PRINCIPLES AND APPLICATIONS

Pereira, C. ¹; Gomes Correia, A. ¹; Ferreira, C. ²; Araújo, N. ¹

¹ Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), Universidade do Minho

² Centro de Estudos da Construção (CEC), Universidade do Porto



RESUMO

Ao longo dos anos têm-se assistido ao desenvolvimento de novas técnicas para a determinação da rigidez dos solos em laboratório, baseadas na determinação direta da velocidade de propagação de ondas sísmicas. Neste contexto, este trabalho apresenta a medição e interpretação de velocidades de ondas sísmicas em ensaios realizados numa areia através do uso combinado de bender elements e acelerómetros. A interpretação das medições do tempo de propagação e da aceleração foi realizada no domínio do tempo e no domínio da frequência. No final, são tecidas considerações relativas aos valores de rigidez obtidos e a uma potencial expansão do setup apresentado para aplicações a uma vasta gama de geomateriais.

ABSTRACT

In the last decades, the development of new laboratory techniques to assess soil stiffness throughout the use of seismic wave-based techniques, have received significant attention. In this context, this paper presents measurements and interpretation of seismic wave velocities from tests performed on a sand and based on the combined use of bender elements with accelerometers. The interpretation of the travel time measurements were performed using time and frequency-domain methods. Finally, considerations concerning stiffness results and an enlarged application of the presented setup to a wide range of geomaterials are made.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos têm-se assistido ao desenvolvimento de novas técnicas para a determinação da rigidez dos solos em laboratório, baseadas na medição e interpretação da velocidade de propagação de ondas sísmicas. Estas técnicas têm por base a utilização de transdutores piezoeléctricos, dos quais se destacam os

bender elements (BE) e os extender elements (EE) que, permitem gerar e registar ondas de corte (onda S) e de compressão (onda P) respetivamente (Jovicic, 2003; Alvarado e Coop, 2012).

A versatilidade e possibilidade de adaptar estes elementos em ensaios geotécnicos correntes (nomeadamente o ensaio triaxial), a não-afetação da fábrica, da estrutura e das

propriedades mecânicas dos materiais, a análise de propriedades importantes como o estado de tensão, índice de vazios e anisotropia, são algumas das vantagens desta técnica (Stokoe e Santamarina, 2000).

Com base na determinação do tempo de propagação das ondas S ou P, é possível determinar a velocidade das ondas, e o respetivo módulo de distorção (G_0) ou volumétrico (M_0), ambos no domínio das muito pequenas deformações (Rio, 2006). Todavia, limitações inerentes às metodologias de análise de sinal e alguma subjetividade na interpretação dos resultados, têm originado o aparecimento na literatura de várias metodologias de interpretação, quer no domínio dos tempos, quer no domínio das frequências (Viggiani e Atkinson, 1995, Greening e Nash, 2004).

Assim, Ferreira (2003); Viana da Fonseca, *et al.*, (2009); Camacho-Tauta (2011) e Styler e Howie (2013) sugerem o uso combinado de métodos de interpretação, como forma de reduzir a incerteza e subjetividade desta técnica. Os métodos sugeridos são o método de medição direta da primeira chegada da onda (no domínio dos tempos), e o método de varrimento de frequências, (cuja análise é realizada no domínio das frequências).

Acresce a existência de algumas condicionantes relativas à aplicabilidade desta técnica em geomaterias de maior rigidez (por exemplo, solos compactados, solos estabilizados com cimento ou rocha branda) e em condições secas que, devido à maior impedância existente entre as rigidezes dos transdutores e do material ensaiado, pode contribuir para um melhor ou pior desempenho de algumas das metodologias de interpretação.

Como forma de contornar estas dificuldades, Martins (2011) e Ferreira *et al.*, (2013), recomendam o uso combinado de acelerómetros (AC) e BE. A utilização deste sistema justifica-se pela não afetação do desempenho dos AC com a utilização de frequências mais elevadas (exigidas para os materiais de maior rigidez) ao contrário dos BE. Este sistema permite ainda obter informações adicionais relativamente à validade dos sinais registados pelos BE, permitindo a sua

validação ou revisão, minimizando a subjetividade inerente a estes ensaios. O facto de os sinais recebidos pelos AC serem da mesma natureza e por isso, diretamente comparáveis, permite ainda que a interpretação das medições de aceleração possa ser feita quer no domínio dos tempos, quer no domínio das frequências. Além disso, os AC podem ser usados de forma independente em materiais de elevada rigidez onde a interpretação de BE tende a ser mais complexa (Ferreira *et al.*, 2013).

Este trabalho tem como objetivo não só a divulgação desta metodologia, mas também visa potenciar a sua aplicação e expansão a uma vasta gama de geomateriais. Para o efeito, utilizou-se uma câmara triaxial do tipo Bishop & Wesley, alterada por forma a poder acomodar um par de BE e AC (mais detalhes em Ferreira *et al.*, 2013) onde se ensaiou uma amostra de areia para vários níveis de compressão isotrópica: 50, 100, 200 e 400 kPa. Na análise dos sinais, foram adotadas as seguintes metodologias de interpretação: i) o método de medição direta da primeira chegada da onda (TD), ii) método da correlação cruzada (CC) e iii) o método de varrimento de frequências (FD).

2. MATERIAIS

2.1. Equipamento

O sistema combinado de BE e AC adotado para a execução do ensaio triaxial envolve um par *bender/extender elements* (B/EE) produzidos pela GDS, que permitem medir em simultâneo a velocidade das ondas S e P (GDS, 2009) (Fig. 1).

Os acelerómetros piezoelétricos utilizados são fabricados pela Brüel & Kjær, do tipo 4513-001, com sensibilidade de 100 mV/g, uma gama de medida de ± 50 g e uma gama de frequência que varia entre 1Hz e 10kHz. Possuem dimensões de 12,7 mm de diâmetro, 15,65 mm de altura e perto de 9g de peso. A fixação ao provete é realizada com recurso a pivôs de cabeça roscada introduzidos no provete após a montagem do mesmo na câmara (mais detalhes em Ferreira *et al.*, (2013)) (Fig. 2).

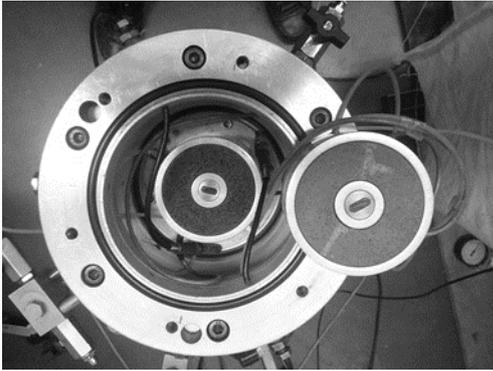


Fig. 1 – Bender/extender elements incorporados na câmara triaxial do tipo Bishop & Wesley

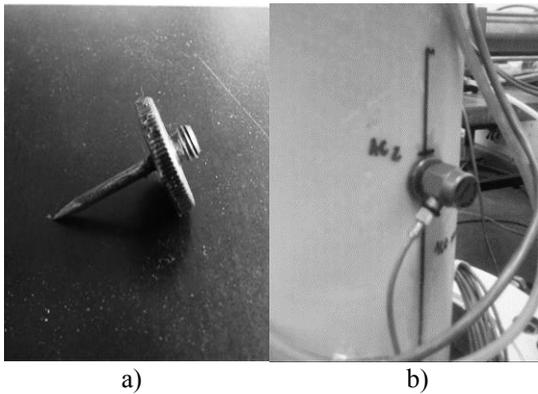


Fig. 2 – Acelerómetros piezoelectricos: a) Detalhe do pivô de cabeça rosca; b) Acelerómetro fixado ao provete.

A pressão na câmara é controlada automaticamente, com a ajuda de uma válvula proporcional pneumática de precisão global de $\pm 0,5$ kPa (mais detalhes em Araújo, 2007, 2010)

O princípio de funcionamento do sistema utilizado consiste num gerador de funções (Huntingdon TG2511) que excita o B/EE transmissor com um sinal elétrico, produzindo vibrações de corte (onda S) ou compressão-extensão (onda P) na base do provete, e que se propagam através do mesmo. O B/EE recetor, em conjunto com o par de AC, é sujeito a essas vibrações que, por sua vez, são convertidas em sinais elétricos, gerando um sinal de saída. Estes sinais são posteriormente recolhidos por um osciloscópio digital (4424 da Pico Technology). Todo este processo é controlado em tempo real com o auxílio do software de análise de sinal da PicoScope (versão 6.7.40.1). No presente artigo é apenas abordada a medição das ondas de corte.

A Fig. 3 esquematiza o sistema de ensaio previamente descrito, composto por um total de quatro sensores - dois B/EE e dois AC.

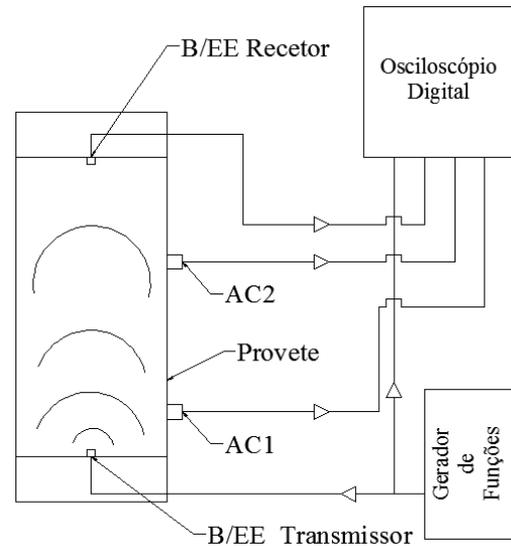


Fig. 3 - Configuração do sistema utilizado.

2.2. Preparação da amostra

O material escolhido para a realização dos ensaios é uma areia artificial, designada por areia de Coimbra, que foi construída entre os peneiros #40 e #140 da série ASTM. A areia apresenta um $D_{50} = 0,28$ mm e um coeficiente de uniformidade próximo de 1,22 (Fig. 4). A escolha deste material foi realizada pelo facto de ser um material de granulometria similar a alguns materiais de referência, frequentemente utilizados pela comunidade científica.

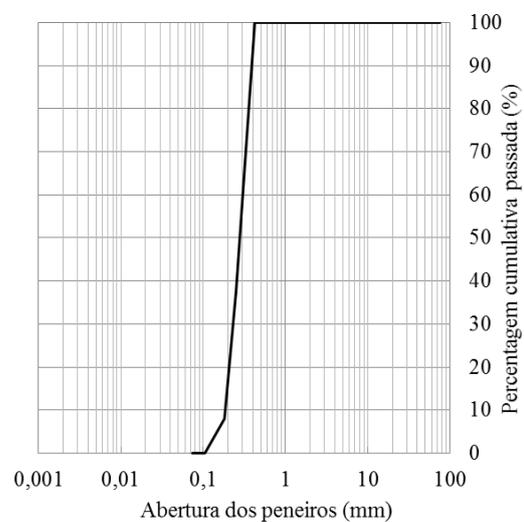


Fig. 4 – Curva granulométrica do material em estudo.

Foi preparado um provete, de acordo com a metodologia de “Dry Tamping”, em cinco camadas (Yang e Gu, 2013). A Tabela 1 apresenta os índices físicos e geométricos da amostra ensaiada.

Tabela 1 - Índices físicos e geometria da amostra ensaiada.

Solo	e	G _s	Massa (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)
P1	0,719	2,63	2379,7	201,5	98,9

Especial atenção foi dada à colocação dos acelerómetros e à fixação dos dois pivôs de cabeça roscada. Este é um processo que envolve a necessidade de furar a membrana e, conseqüentemente, a selagem dessa zona é realizada de forma convenientemente com recurso a cianoacrilato. Posteriormente, é fixado um AC em cada um desses pivôs (**Fig. 2b**). A distância entre AC foi determinada com base em estudos anteriores (Camacho-Tauta *et al.*, 2009; Marjanovic, 2012; Ferreira *et al.*, 2013). O primeiro AC (AC1) foi colocado a 30 mm da base do provete, e o AC2 a 100 mm de distância ao AC1 (**Fig. 3**). Detalhes relativos às fases que envolvem a montagem do provete podem ser encontrados em Pereira *et al.*, (2014).

3. MÉTODOLOGIA DE ENSAIO

Como mencionado anteriormente, na análise dos sinais, foram adotadas três metodologias de interpretação distintas: i) o método de medição direta da primeira chegada da onda (TD), ii) o método da correlação cruzada (CC) e, iii) o método de varrimento de frequências (FD).

Antes de proceder a qualquer uma destas análises é recomendável identificar a frequência de melhor resposta do BE recetor e garantir que a razão entre distância entre BE (L_{tt}) e comprimento de onda (λ) é superior a dois, por forma a evitar problemas com o efeito de vizinhança (Camacho-Tauta, 2012). A identificação da frequência de melhor resposta do BE recetor foi realizada com recurso à Transformada Rápida de Fourier (TRF) (**Fig. 5**).

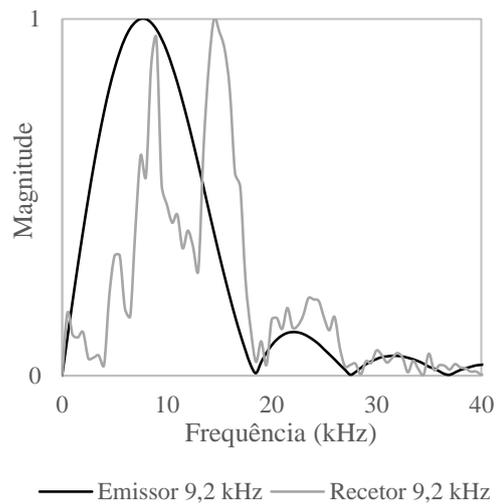


Fig. 5 - Exemplo de Transformadas de Fourier para impulso sinusoidal de 9,2 kHz com $p' = 50kPa$.

A **Fig. 6** apresenta um exemplo de identificação do tempo de chegada com recurso ao método de medição direta da primeira chegada da onda para os BE. O tempo de propagação (tt) é determinado pela diferença entre o tempo de chegada e o tempo no início do impulso sinusoidal, onde é subtraído o atraso provocado pelo equipamento ($\pm 5.0 \mu s$).

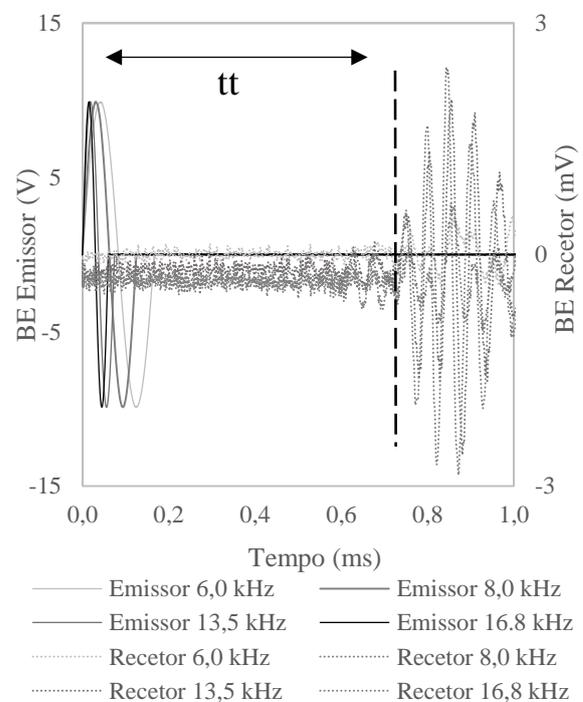


Fig. 6 - Identificação do tempo de chegada com recurso ao método de medição direta da primeira chegada da onda nos *bender elements* para $p' = 100kPa$.

Um número mínimo de quatro sinais de entrada e de saída são registados, dispostos e analisados em simultâneo, com o objetivo de eliminar incertezas na determinação de tt , introduzidas por problemas como o ruído aleatório e interferência da onda P.

Como forma de confirmar as leituras anteriores recorre-se ao método da correlação cruzada (CC) entre sinais, (Fig. 7).

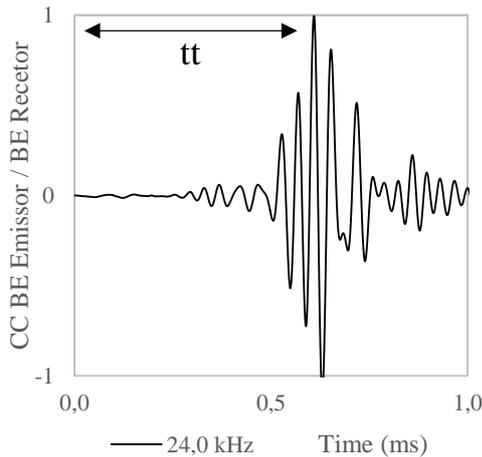


Fig. 7 – Exemplo de correlação cruzada entre sinal emitido e recebido pelos *bender elements* para um impulso sinusoidal com frequência de 24,0 kHz e para um $p' = 200$ kPa.

A determinação da velocidade das ondas de corte (V_s) e do Módulo de Distorção (G_0) é feito com recurso às Eq. (1) e (2), onde (ρ) é a massa volúmica do solo.

$$V_s = \frac{L_{tt}}{tt} \quad (1)$$

$$G_0 = \rho \times V_s^2 \quad (2)$$

Importa referir que a distância de propagação (L_{tt}), no caso dos BE, é igual ao comprimento ponta-a-ponta entre BE, isto é, a altura da amostra menos duas vezes o comprimento dos BE (Brignoli *et al.*, 1996); Em relação aos AC, considera-se L_{tt} como a distância entre os mesmos.

Para a utilização do método de varrimento de frequências, procede-se à geração de um sinal de varrimento sinusoidal linear com frequências entre 1-50 kHz, durante um período total de 10 ms, e a uma amplitude de 10 V (Fig. 8);

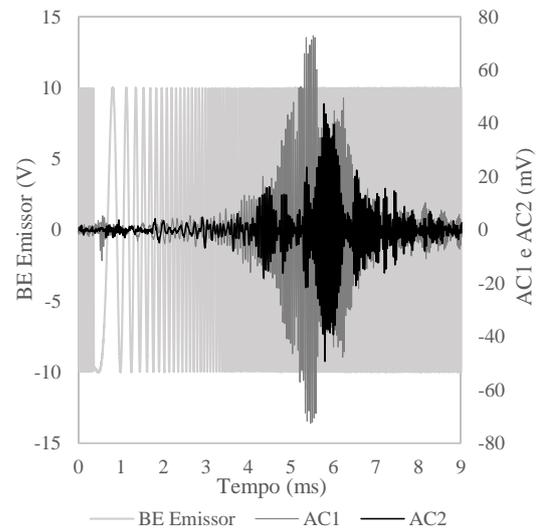


Fig. 8 - Resposta dos acelerómetros ao varrimento sinusoidal linear com frequências entre 1-50 kHz com $p' = 200$ kPa.

O tt é determinado recorrendo à função de transferência entre os sinais, e à função de coerência que, avalia a “qualidade” da função de transferência. Com o auxílio de um procedimento chamado “Unwrapped” - utilizado para a remover os saltos da função de transferência -, determina-se o declive da reta onde a gama de frequências apresenta um valor máximo de coerência, e calcula-se tt através da Eq (3) (Fig. 9).

$$tt = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\phi}{df} \quad (3)$$

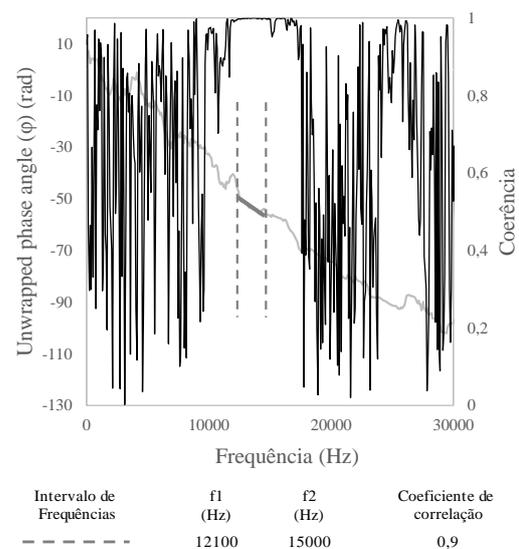


Fig. 9 - Relação entre a Coerência e o *Unwrapped phase angle* nos acelerómetros para o varrimento sinusoidal linear com frequências entre 1-50 kHz com $p' = 200$ kPa.

4. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos nas diferentes medições, onde é possível observar que as diferenças máximas dos valores de V_S , medidos através dos BE e dos AC, variam de 0 a 9%.

Tabela 2 - Resumo comparativo dos valores de velocidade das ondas S, determinados com base uso combinado de *bender elements* e acelerómetros.

Tipo de sensor	Método de determinação de tt	Valor de V_S (m/s)			
		Confinamento (kPa)			
		50	100	200	400
BE	TD	230	272	319	370
	CC	224	273	321	380
	FD	190	255	285	361
AC	TD	230	272	319	370
	CC	224	273	321	380
	FD	190	255	285	361
Diferença Entre BE e AC (%)	TD	5%	5%	6%	7%
	CC	2%	2%	3%	0%
	FD	5%	9%	9%	2%

Sem ignorar que G_0 varia com o quadrado da velocidade da onda de corte (Eq. (2)), dada a subjetividade inerente a cada uma das diferentes metodologias de interpretação, considera-se que os resultados obtidos apresentam variações pouco significativas e estão dentro de limites considerados satisfatórios.

Posteriormente, os valores de G_0 obtidos nos diferentes métodos de interpretação foram comparados com as Eq. (4) (distorções na ordem de grandeza $\gamma = 10^{-6}$) e (5) (distorções na ordem de grandeza $\gamma = 10^{-5}$) (Yamashita et al., 2009).

$$G = 14,1 \times f(e) \times p^{0,4} \quad (4)$$

$$G = 11,1 \times f(e) \times p^{0,44} \quad (5)$$

$$f(e) = \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \quad (6)$$

Da análise à Fig. 10, observa-se que, quer para os BE, quer para os AC, os resultados obtidos não diferem muito entre metodologias de interpretação. Quando comparamos a mes-

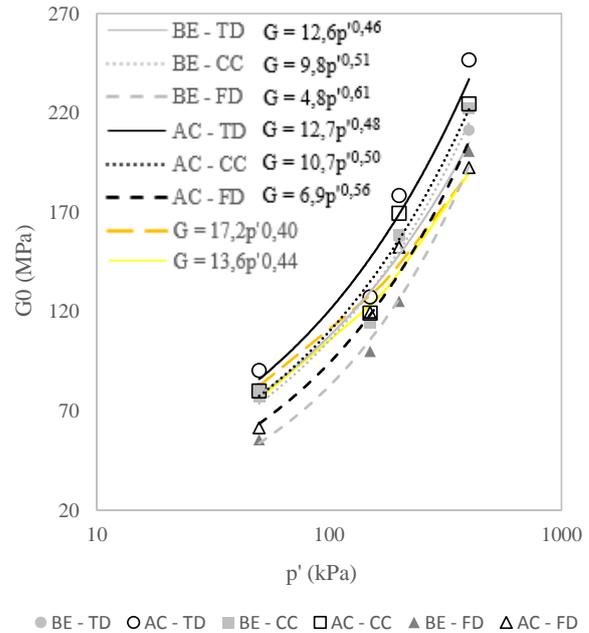


Fig. 10 - Comparação entre os valores de G_0 obtidos pelos diferentes métodos de interpretação de tt e expressões empíricas.

ma metodologia em diferentes sensores, verificamos que existe semelhança nos resultados obtidos, em especial no método da correlação cruzada. Este é também o método que apresenta melhor ajuste às Eq. (4) e (5) em praticamente todas as pressões de confinamento.

Analisando exclusivamente as metodologias TD e FD, podemos observar que nas pressões de confinamento mais baixas (50 e 100 kPa), se verifica um melhor ajuste da metodologia de interpretação TD, comparativamente à metodologia FD. Por sua vez, a metodologia FD, têm melhor aproximação às Eq. (4) e (5) nas pressões de confinamento mais elevadas (200 e 400 kPa).

A Eq. (7) é construída na forma das Eq (4) e (5) e não tem homogeneidade dimensional - os valores numéricos dos parâmetros A e m dependem por isso do sistema de unidades utilizado (Camacho-Tauta, 2012).

$$G = A \times f(e) \times p^m \quad (7)$$

Uma compilação de vários resultados mostra que, m varia geralmente entre 0,4 a 0,5, e A entre 7,0 a 14,1 para G_0 e p' expressos em MPa e kPa respetivamente

(Yamashita et al., 2009). Assim, ao analisar as equações das regressões logarítmicas correspondentes a cada um dos métodos de interpretação, com exceção da metodologia FD para os BE, os restantes métodos apresentam valores considerados como admissíveis para os parâmetros m e p' .

5. CONCLUSÕES

Com o propósito de potenciar a aplicação e expansão do uso combinado de bender elements e acelerómetros na determinação de algumas das propriedades dinâmicas dos geomateriais, foram realizadas medições de velocidade de ondas sísmicas (onda S) num provete de areia sujeito a diferentes pressões de confinamento, com vista à determinação do módulo de distorção (G_0).

Ao nível do desempenho do sistema utilizado, as diferenças observadas nos valores da velocidade das ondas S calculados com base nos tt determinados pelos diferentes tipos de sensores (fazendo uso de diferentes metodologias de interpretação) foram pouco significativas.

Numa análise individual a cada um dos sensores, constata-se que AC2 apresentou sempre sinais muito contaminados por onda P e possíveis reflexões de ondas S, originando algumas dificuldades na determinação de tt quando utilizada a metodologia TD. Este é um problema que pode estar relacionado com fixação do AC à amostra, ao tipo de material ou até mesmo com geometria dos provetes. Ainda assim, a qualidade dos sinais registados pelos AC, sobretudo para tensões de confinamento mais elevadas (rigidez mais elevada), confirma a pertinência e a utilidade da sua aplicação em ensaios de com BE.

A utilização de diferentes metodologias de interpretação de tt , permitiu também comparar e dissipar algumas das dúvidas provocadas fundamentalmente pela qualidade dos sinais captados pelos sensores. A destacar a metodologia da CC entre sinais emitidos e recebidos pelos BE que, revelou resultados bastante coerentes, tendo em conta o facto de que não estamos

a tratar sinais da mesma natureza. Tal comportamento pode estar relacionado com a prévia avaliação da qualidade dos sinais de reposta, através da análise dos espectros de frequência.

No que respeita às metodologias TD e FD, estas apresentaram comportamentos distintos em função das pressões de confinamento. De futuro, considera-se pertinente a realização de novos ensaios com o objetivo de perceber a fiabilidade de cada metodologia em função da rigidez do material.

Por último, quando comparamos os valores de G_0 obtidos nas diferentes metodologias com as Eq. (4) e (5) verificamos que, de uma forma geral, a metodologia aqui apresentada responde à necessidade de aferir de uma forma correta o módulo de distorção.

A destacar contudo o desempenho menos positivo por parte da metodologia FD nos BE. Mais uma vez, o facto de os sinais (emitido e recebido) não serem da “mesma natureza”, - motivo para possíveis erros de interpretação -, pode estar na origem na diferença de desempenho, em comparação com as restantes metodologias.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio dado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projeto de investigação WaveSoil (PTDC/ECM/122751/2010) do projeto FCOMOP-01-0124-FEDER-020365 no âmbito da qual este trabalho foi desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- Alvarado, G., & Coop, M. R. (2012). On the performance of bender elements in triaxial tests. *Géotechnique*, 62(1), 1–17.
- Araújo, N. (2007). Desenvolvimento de equipamento triaxial de precisão para a obtenção do limite elástico de geomateriais. Guimarães.

- Araújo, N. (2010). *High-speed trains on ballasted railway track – Dynamic Stress-field analysis*. University of Minho.
- Brignoli, E., Gotti, M., & Stokoe, K. (1996). Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2(2).
- Camacho-Tauta, J. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods*. Technical University of Lisbon.
- Camacho-Tauta, J. (2012). A procedure to calibrate and perform the bender element test. *Dyna*, 10–18.
- Camacho-Tauta, J., Cascante, G., Dos Santos, J. A., & Viana da Fonseca, A. (2009). Measurements of shear wave velocity by resonant-column test, bender element test and miniature accelerometers. In *Pan-Am Geotechnical Conference* (pp. 1–9). Toronto.
- Ferreira, C. (2003). Bender element tests measurements using time and frequency domain techniques. In *3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*. Lyon, France.
- Ferreira, C., Martins, J. P., & Gomes Correia, A. (2013). Determination of the small-strain stiffness of hard soils by means of bender elements and accelerometers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 6, 1–7.
- Jovicic, V. (2003). Conditions for rigorous bender element test in triaxial cell. In *Proceedings of the workshop on current practices of the use of bender element technique*. Lyon, France.
- Marjanovic, J. (2012). *The study of shear and longitudinal velocity measurements of sands and cohesive soils*. Massachusetts Institute of Technology.
- Martins, J. (2011). *Compaction and its influence on the structural behaviour of high speed railways*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/19685>
- Pereira, C., Gomes Correia, A., Ferreira, C., Araújo, N., & Martins, J. P. (2014). Medição e Interpretação da Rigidez de uma areia no âmbito das muito pequenas deformações. In *14 Congresso Nacional de Geotecnia*. Covilhã: SPG.
- Rio, J. F. (2006). *Advances in laboratory geophysics using bender elements*. University College London.
- Stokoe, K. H., & Santamarina, J. C. (2000). Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering. In *Proceedings of the GeoEng 2000 Conference*. (pp. 1490–1596). Melbourne, Australia.
- Styler, M. A., & Howie, J. A. (2013). Continuous monitoring of Bender Element shear wave velocities during triaxial testing. *Geotechnical Testing Journal*.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., & Fahey, M. (2009). A framework interpreting bender element tests, combining time-domain and frequency-domain methods. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 32(2), 91–107.
- Yamashita, S., Kawaguchi, T., & Nakata, Y. (2009). Interpretation of international parallel test on the measurement of G_{max} using bender elements. *Soils and Foundations*, 49(4), 631–650.
- Yang, J., & Gu, X. (2013). Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size? *Géotechnique*, 63(2), 165–179.