

MEDIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DA RIGIDEZ DE UMA AREIA NO ÂMBITO DAS MUITO PEQUENAS DEFORMAÇÕES

MEASUREMENTS AND INTERPRETATION OF SMALL STRAIN STIFFNESS OF A SAND

Pereira, Cláudio; C-TAC, Guimarães, Portugal, cpereira@civil.uminho.pt

Gomes Correia, António; C-TAC, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt

Ferreira, Cristiana; FEUP, Porto, Portugal, cristiana@fe.up.pt

Araújo, Nuno; C-TAC, Guimarães, Portugal, nuno@civil.uminho.pt

Martins, João Paulo; UMA, Funchal, Portugal, jmartins@uma.pt

RESUMO

Este trabalho apresenta a medição e interpretação de velocidades de ondas sísmicas em ensaios realizados numa areia através do uso combinado de bender elements (BE) e acelerómetros (AC). A amostra foi preparada para um determinado índice de vazios e ensaiada em ensaio monotónico de compressão isotrópica até 400 kPa. A técnica dos BE foi utilizada com vista à determinação do módulo de distorção (G_0) no âmbito das muito pequenas deformações. Para melhorar a consistência das medições, dois AC foram utilizados em conjunto com os BE. Na determinação de G_0 foram utilizados, simultaneamente, análises no domínio dos tempos e das frequências. São apresentadas considerações relativas aos diferentes valores de G_0 obtidos nas distintas análises. A relação de G_0 com a tensão normal média efetiva é avaliada para a areia de estudo e comparada com expressões empíricas.

ABSTRACT

This paper presents measurement and interpretation of seismic wave velocities from tests conducted on a sand, based on the combined use of bender elements (BE) with accelerometers (AC). The specimen was prepared at certain initial void ratio and monotonic-isotropically compressed up to 400 kPa. The BE technique was used to determine the sand shear modulus (G_0) at very small strains. In order to increase the reliability of the measurements, two AC were jointly used with BE. The G_0 stiffness was determined using time and frequency-domain methods. The systematic differences observed between the G_0 values, calculated using the different methods are discussed. The relationship between G_0 and the effective mean normal stress was evaluated for the studied sand and compared with empirical expressions.

1 - INTRODUÇÃO

No domínio das muito pequenas deformações, o módulo de distorção inicial (G_0) apresenta-se como um parâmetro de referência na determinação das propriedades dinâmicas do solo. A sua determinação pode ser feita in-situ e/ou em laboratório, e está fortemente dependente da sensibilidade dos instrumentos utilizados. Em laboratório, destacam-se equipamentos como a coluna ressonante, geralmente utilizada para determinar G_0 desde muito pequenas a médias deformações (10^{-6} a 10^{-4}) e o triaxial, para deformações que variam entre 10^{-4} e 10^{-2} (Figura 1).

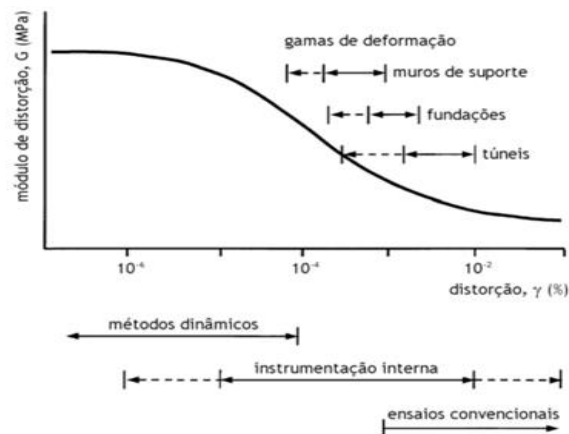


Figura 1 - Curva de degradação da rigidez com o nível de deformação (adaptado de Atkinson e Salfors, 1991).

Ao longo dos anos têm-se assistido ao desenvolvimento de novas técnicas para a determinação de G_0 em laboratório, nomeadamente em ensaios triaxiais (Jovic, 1992; Alvarado e Coop, 2012). Estas técnicas assentam na determinação direta da velocidade de propagação de ondas sísmicas, e fazem uso de transdutores piezoelétricos. Deste tipo de transdutores, destacam-se os bender elements (BE) e os extender elements (BEE) que permitem gerar e registar ondas de corte (S) e compressão (P). Estas são geradas de acordo com movimentos de flexão (ondas-S) e de compressão-extensão (ondas-P), sendo a deformação associada a esses movimentos da ordem de 10^{-6} (Rio, 2006).

A versatilidade e facilidade em acomodar estes elementos em ensaios geotécnicos, fazem desta técnica um foco de interesse por parte da comunidade científica, ao permitir um "upgrade" da informação disponível e a possibilidade de efetuar medições quase contínuas da velocidade das ondas sísmicas no decorrer dos ensaios. Contudo, existem ainda limitações e incertezas associadas a esta técnica, relacionadas sobretudo com a determinação do tempo de propagação (t_t) e as metodologias empregues para o efeito, que contribuem para alguma inconsistência nos resultados (Lee e Santamarina, 2005).

O acoplamento dos transdutores (Jovicic, 2003; Arroyo et al., 2010), o alinhamento entre estes (Ibrahim et al., 2011), interferências elétricas e ruído (Lee e Santamarina, 2005; Ferreira, 2008), fenómenos de dispersão e de reflexão das ondas (Sanchez-salinerio et al., 1986; Brignoli et al., 1996; Arulnathan et al., 1998; Arroyo et al., 2003; Lee e Santamarina, 2005), assim como a geometria dos provetes (Rio, 2004), são alguns dos fatores que podem afetar a qualidade dos sinais emitidos e recebidos pelos BE e, conseqüentemente dificultar a interpretação e análise dos mesmos.

Na tentativa de minimizar algumas destas incertezas, têm sido propostas diversas metodologias de análise de sinal, no domínio dos tempos (Arroyo, 2001; Arulnathan et al., 1998; Chan, 2011; Jovičić et al., 1996; Lee e Santamarina, 2005; Viggiani e Atkinson, 1995; Yamashita et al., 2009) e no domínio das frequências (Greening e Nash, 2004; Lee e Santamarina, 2005; Ferreira, 2008; Alvarado e Coop, 2012). Todavia, a prática têm revelado a existência de algumas disparidades entres os resultados obtidos nas várias metodologias.

Segundo Ferreira et al., (2010), a utilização de diferentes materiais e diferentes condições de ensaio pode contribuir para o pior desempenho de algumas das metodologias de interpretação. Como forma de contornar esta dificuldade, Ferreira (2003); Viana da Fonseca, Ferreira, e Fahey (2009); Camacho-Tauta (2011) e Styler e Howie (2013) sugerem o uso combinado de métodos de interpretação, visando reduzir a incerteza e subjetividade desta técnica. Os métodos utilizados 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 feita no domínio das frequências).

Como forma alternativa e complementar à medição direta dos sinais de BE, Martins (2011) e Ferreira, Martins, & Gomes Correia (2013), recomendam o uso combinado de acelerómetros (AC) e BE. Segundo os autores, este sistema combinado de medição de ondas sísmicas permite obter informações adicionais relativamente à validade dos sinais registados pelos BE e assim, minimizar a subjetividade inerente a estes ensaios. O facto de os sinais recebidos pelos AC serem da mesma natureza e por isso, diretamente comparáveis, permite que a interpretação das medições de aceleração possa ser feita quer no domínio dos tempos, quer no domínio das frequências.

Este trabalho apresenta resultados relativos à medição e interpretação de velocidades de ondas sísmicas de ensaios realizados numa areia. Para o efeito, utilizou-se uma câmara triaxial (comumente designada por stress-path ou Bishop-Wesley), alterada por forma a poder acomodar um par de BE e AC. No tocante à análise dos sinais, foram adotadas metodologias distintas: 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). Importa acrescentar que a amostra foi ensaiada para vários níveis de compressão isotrópica: 50, 100, 200 e 400 kPa.

2 - MÉTODOS

2.1 - Equipamento

O sistema utilizado para a execução do ensaio triaxial com medição de ondas sísmicas comporta um par BEE adaptados a uma câmara triaxial stress-path. Este tipo de transdutores foram produzidos pela GDS e permitem medir em simultâneo a velocidade das ondas-P e S (GDS, 2009). O controlo da pressão na câmara é feito através de uma válvula proporcional pneumática (MPV1MFEE150AXL) com uma resolução típica de $\pm 0.005\%$ F.S. para uma gama completa de 1000 kPa.

No que toca ao sistema combinado de BEE e AC instalado, o princípio de funcionamento é o seguinte. Com a ajuda de um gerador de funções (Huntingdon TG2511), o BEE transmissor é excitado por um sinal elétrico, que induz vibrações de compressão-extensão (ondas-P) ou corte (ondas-S), e que se propagam através

do material a ensaiar. O BEE 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 depois 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). Importa referir que, no presente artigo apenas serão abordados os ensaios com medição das ondas-S.

Os AC 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. Com dimensões de 12,7mm de diâmetro, 15,65mm de altura e cerca de 9g de peso, a sua adesão ao provete, foi realizada com recurso a pivôs de cabeça rosca introduzidos no provete após a montagem do mesmo na câmara (mais detalhes em Ferreira et al., (2013)).

Na Figura 2 podemos observar o sistema de ensaio utilizado, composto por um total de quatro sensores, dois BEE e dois AC, de acordo com a instrumentação descrita anteriormente.

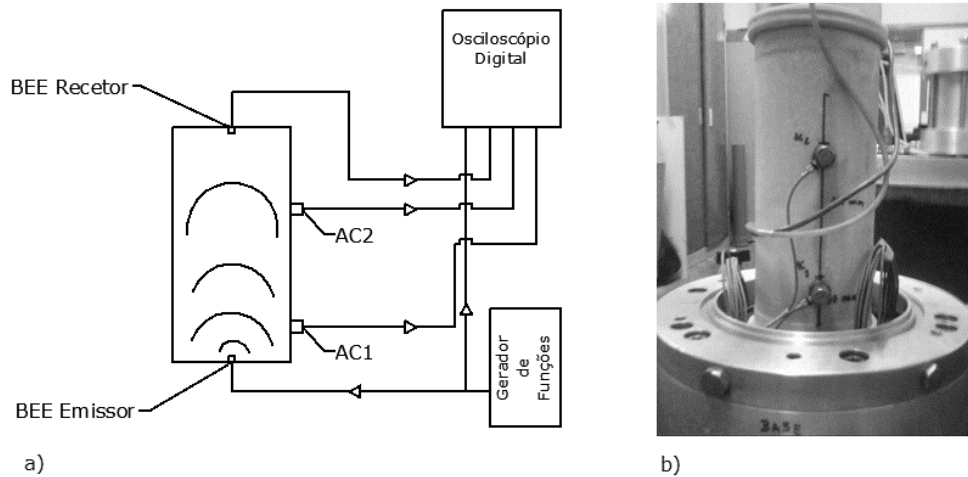


Figura 2 - Configuração do sistema utilizado: a) Esquema; b) Fotografia da configuração de montagem P1.

2.2 - Preparação da amostra

O material escolhido para a realização dos ensaios trata-se de uma areia mal graduada com um $D_{50} = 0.28$, e com um coeficiente de uniformidade próximo de 1.22. A escolha deste material foi feita pelo facto de ser um material de granulometria similar a alguns materiais de referência, frequentemente utilizados pela comunidade científica. Foi preparado um único provete, de acordo com a metodologia de "Dry Tamping", em cinco camadas (Yang & Gu, 2013). O Quadro 1 apresenta as propriedades físicas e geométricas da amostra ensaiada. A curva granulométrica obtida para este material apresenta-se na Figura 3.

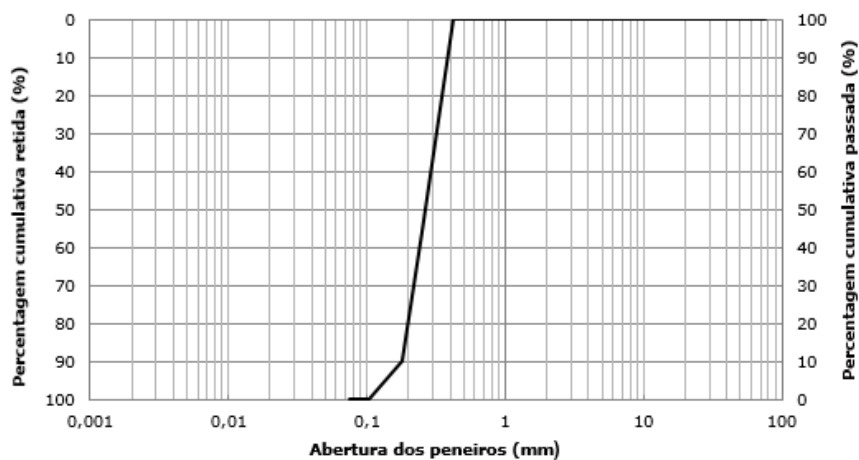


Figura 3 - Curva granulométrica do material em estudo.

Foi preparado um único provete, de acordo com a metodologia de "Dry Tamping", em cinco camadas (Yang & Gu, 2013). O Quadro 1 apresenta as propriedades físicas da amostra ensaiada.

Quadro 1 – Propriedades físicas e geométricas da amostra ensaiada.

Proвете	C _u (.)	G _s (.)	Altura Inicial (mm)	Diâmetro Inicial (mm)	Massa Seca (g)	Índice de vazios inicial (.)
P1	1.22	2.65	201.47	98.78	2379.69	0.719

A areia é posta a secar na estufa durante 24 horas, com o objetivo de eliminar qualquer humidade inicial. Uma vez arrefecido o material, este é pesado até se verificar um peso constante ao fim de dois ciclos de secagem consecutivos.

De acordo com as dimensões do provete e do índice de vazios pretendido, separa-se a massa de solo em cinco porções iguais. Dois "o-rings" são colocados no pedestal da base. É colocada uma membrana num molde (este com a particular característica de se abrir em dois) e ambos são acomodados no pedestal da base. Uma bomba de vácuo é utilizada para manter a membrana junto ao molde, garantindo assim a forma cilíndrica do provete.

Com a ajuda de um funil, o solo é cuidadosamente vertido para o interior do molde com a membrana. Durante este processo, é mantida uma altura de queda constante, sendo cada camada posteriormente compactada, com um pistão (219,21 g) (Figura 4a)). A altura final de cada camada é verificada com uma régua, a fim de garantir o índice de vazios pretendido. Este processo é repetido para as próximas quatro camadas.

A parte superior da membrana é limpa de modo a remover quaisquer partículas que possam interferir com a selagem desta. O pedestal de topo é colocado cuidadosamente para introduzir o BE em contacto com o solo. Uma vez que, nesta fase o molde ainda se mantém a confinar a amostra, presume-se que tal passo não produz alterações significativas no solo (Figura 4b)).

Assim que o pedestal de topo e o provete estão em contacto, é feita a selagem da membrana com o recurso a dois "o-rings". Posteriormente, são aplicados 25 kPa de vácuo para o interior da amostra, e o molde é removido.

Por último, dois pivôs roscados são introduzidos no provete. Este processo envolve a necessidade de furar a membrana e o isolamento convenientemente dessa zona, sendo posteriormente roscado um AC em cada um desses pivôs. Com base em estudos anteriores, optou-se por colocar o primeiro AC (AC1) a 30 mm da base do provete, sendo a distância entre AC1 e AC2 de 100mm (Camacho-Tauta, Cascante, Dos Santos, e Viana da Fonseca, 2009; Ferreira et al., 2013; Marjanovic, 2012) (Figura 4c)). Em seguida, mede-se a altura inicial da amostra e o diâmetro. O vácuo aplicado é substituído por uma pressão de confinamento de 25 kPa (Figura 4d)).

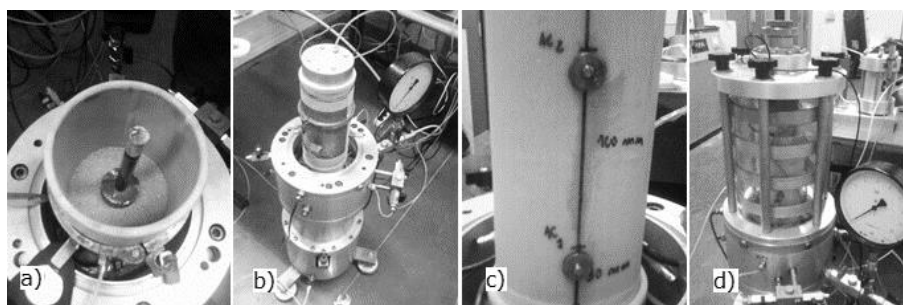


Figura 4 – Preparação do provete de areia.

2.3 - Procedimento de ensaio

A amostra foi submetida a testes sobre condições não saturadas e sujeito a 50, 100, 200 e 400 kPa de pressões de confinamento isotrópico. Para cada fase de confinamento, foi realizado o seguinte procedimento de ensaio:

- Identificação da frequência de melhor resposta do BE recetor com recurso à Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Figura 5);

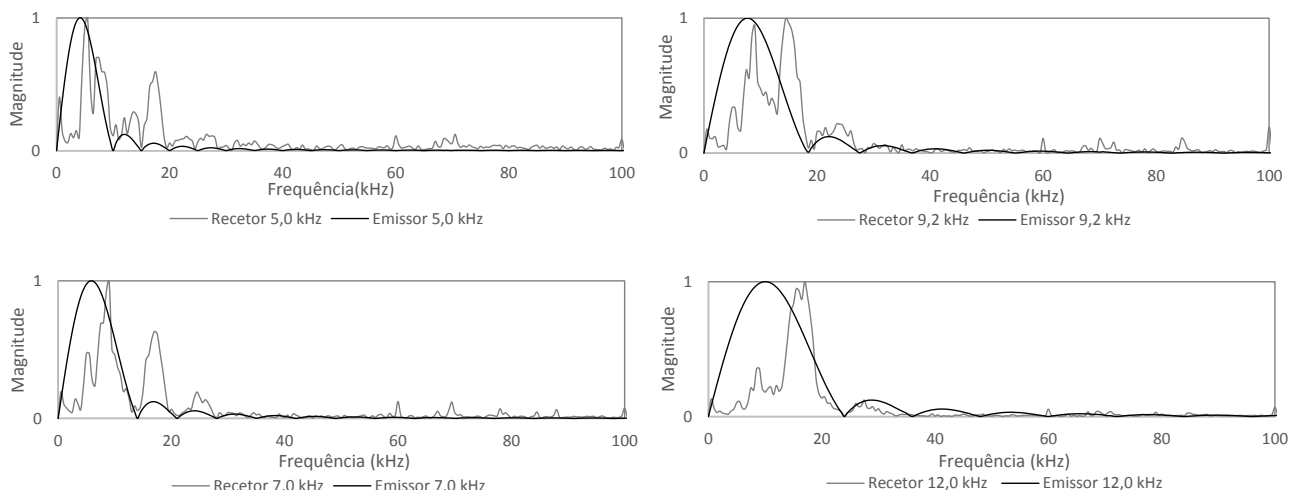


Figura 5 – Bender Elements - Exemplo de Transformadas de Fourier para impulsos sinusoidais com $p' = 50\text{kPa}$.

- Geração de impulsos sinusoidais com frequências de 1-30 kHz, sendo adotado um período do sinal por forma a permitir tempo suficiente para a atenuação da resposta antes de ser gerado o próximo impulso (Figura 6 e Figura 7);
- Registo de um número mínimo de quatro sinais de entrada e de saída, dispostos e analisados em simultâneo, com o objetivo de eliminar problemas como o ruído aleatório e obter um sinal de resposta mais limpo (Figura 6 e Figura 7);
- Identificação do tempo de chegada com recurso ao método de medição direta da primeira chegada da onda. O tempo de propagação (t_t) é diferença entre o tempo de chegada e o tempo no início do impulso sinusoidal, onde é subtraído o atraso provocado pelo equipamento ($\pm 5.0 \mu\text{s}$) (Figura 6 e Figura 7);

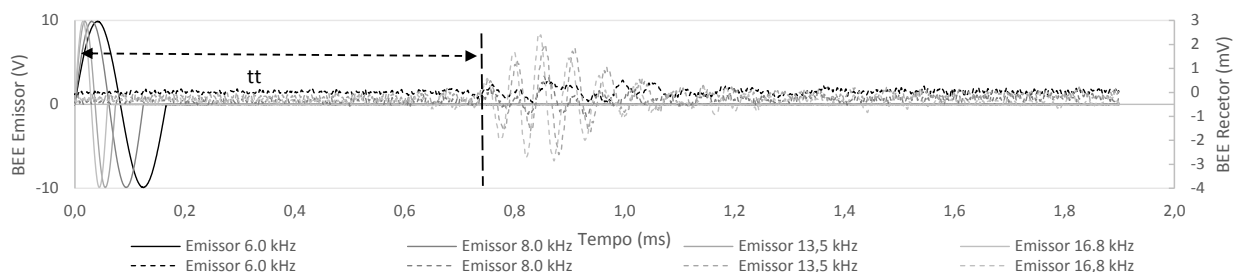


Figura 6 – Bender Elements – Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de t_t para $p' = 100\text{kPa}$.

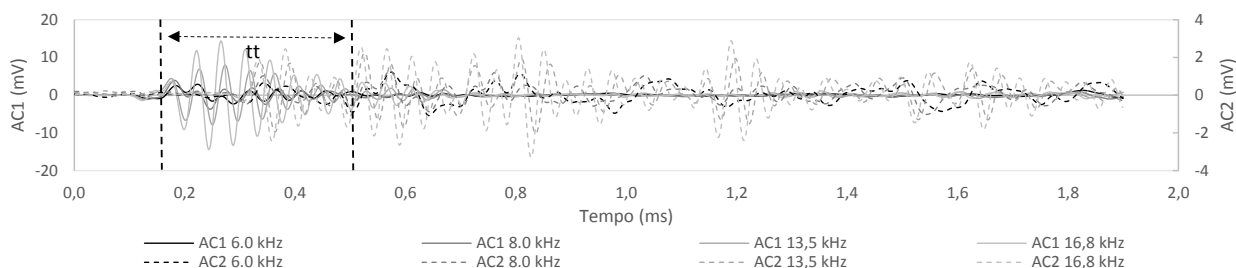


Figura 7 - Acelerómetros – Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de t_t entre AC1 e AC2 para $p' = 100\text{kPa}$.

- Como forma de comparar as leituras anteriores recorre-se ao método da correlação cruzada (CC), entre sinais $x(t)$ e $y(t)$. De acordo com a expressão [1], F e F^{-1} são a FFT e a Inversa da FFT

respetivamente sendo que, o símbolo * representa o complexo conjugado da Transformada. Este método é efetuado entre BE e entre AC separadamente (Figura 8);

$$CC(t) = F^{-1}[F\{x(t)\} \times F^*\{y(t)\}] \quad [1]$$

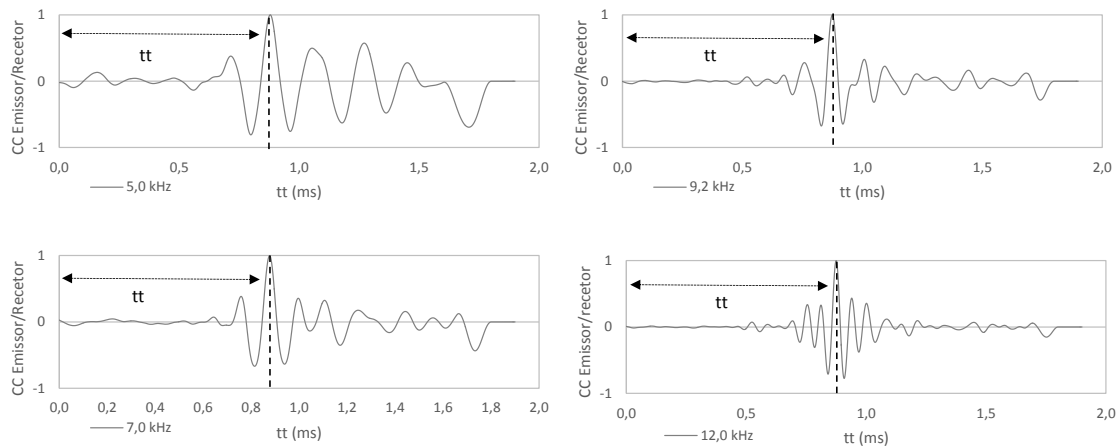


Figura 8 - Bender Elements – Correlação cruzada entre sinais de entrada e de saída para $p' = 50$ kPa.

- 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 AC;
- Determinação da velocidade das ondas de corte (V_s) e de G_0 com base nas equações [2] e [3], onde (ρ) é a massa volúmica do solo;

$$V_s = \frac{L_{tt}}{tt} \quad [2]$$

$$G_0 = \rho \times V_s^2 \quad [3]$$

- Por último, 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 $20 V_{pp}$;
- O tt é determinado fazendo uso da função de transferência entre os sinais (Wrapped phase angle (ϕ)) (Figura 9b)), e da função de coerência – avalia a “qualidade” da função de transferência (Figura 9c)). Para isso é necessário realizar um procedimento chamado de “Unwrapped” isto é, remover os saltos da função de transferência;
- O resultado desta operação é apresentado na Figura 9d). Com base no “Unwrappe phase angle” da função, determina-se o declive da reta onde a gama de frequências apresenta um valor máximo de coerência, e calcula-se tt através da equação [4].

$$tt = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\phi}{df} \quad [4]$$

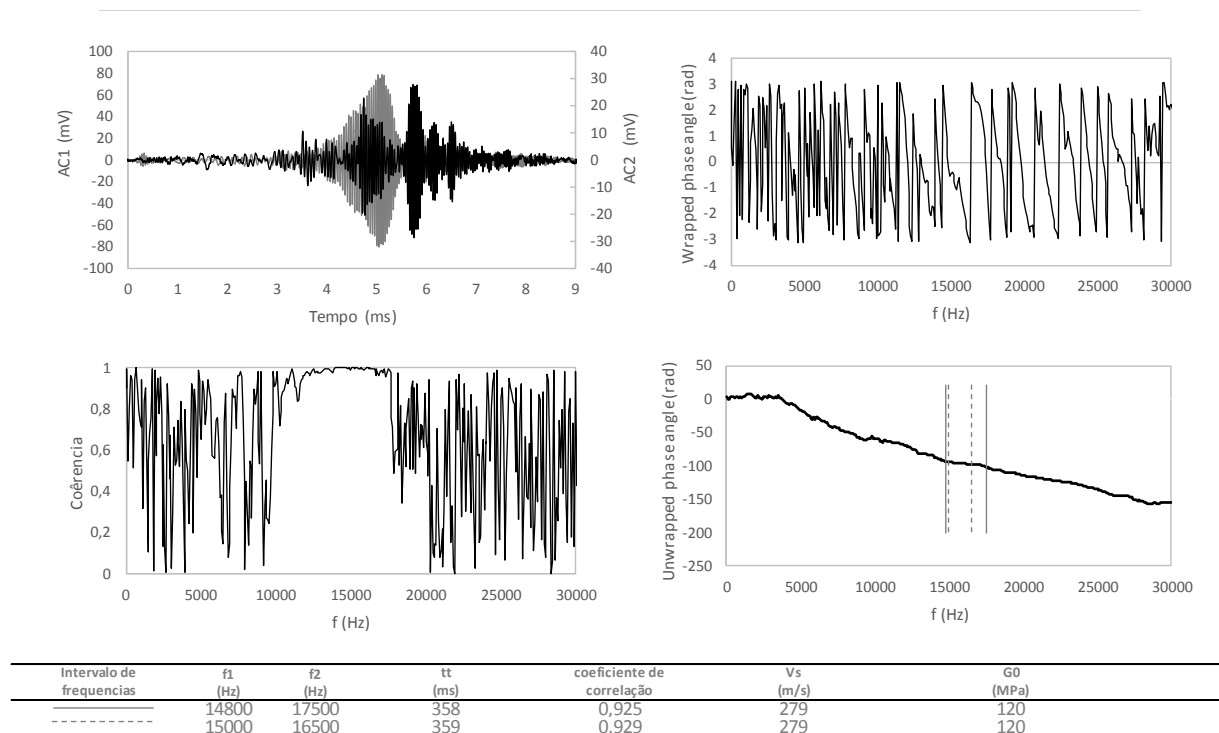


Figura 9 – Acelerómetros - Resultados para $p' = 100\text{kPa}$; a) Sinais recebidos por AC1 e AC2; b) Wrapped phase angle; c) coerência; d) Unwrapped phase angle.

3 - RESULTADOS

Como referido anteriormente, no decorrer do ensaio, para as diferentes fases de compressão isotrópica, foram realizadas medições de velocidade de ondas sísmicas (ondas S), envolvendo o uso combinado de BE e AC com o objetivo de determinar o módulo de distorção. Assim, no Quadro 2 apresenta-se um resumo comparativo dos resultados obtidos nas diferentes medições, em termos de V_s .

Quadro 2 - Resumo comparativo dos resultados da determinação de V_s com base na medição da velocidade de ondas sísmicas através do uso combinado de BE e AC.

Método de Medição	Método de determinação de tt	Valor de V_s (m/s)			
		Tensão de Confinamento (kPa)			
		50	100	200	400
BE	Domínio dos Tempos	230	272	319	370
	Correlação Cruzada	224	273	321	380
	Domínio das Frequências	190	255	285	361
AC	Domínio dos Tempos	242	287	340	400
	Correlação Cruzada	228	278	331	382
	Domínio das Frequências	200	279	314	353
Diferença entre BE e AC (%)	Domínio dos Tempos	5%	5%	6%	7%
	Correlação Cruzada	2%	2%	3%	0%
	Domínio das Frequências	5%	9%	9%	2%

Pela análise do Quadro 2 é possível constatar que neste caso de estudo as diferenças máximas dos valores de V_s , medidos através dos BE e dos AC, são de 0 a 9%. Dada a subjetividade inerente à interpretação dos BE e as diferenças entre metodologias de interpretação, considera-se que os resultados obtidos apresentam variações pouco significativas e estão dentro de limites satisfatórios. Como é sabido, G_0 varia com o

quadrado da velocidade da onda de corte (expresso em [2]), o que resulta no facto de as diferenças anteriores se tornarem mais visíveis, conforme se pode observar na Figura 10, mas ainda assim aceitáveis.

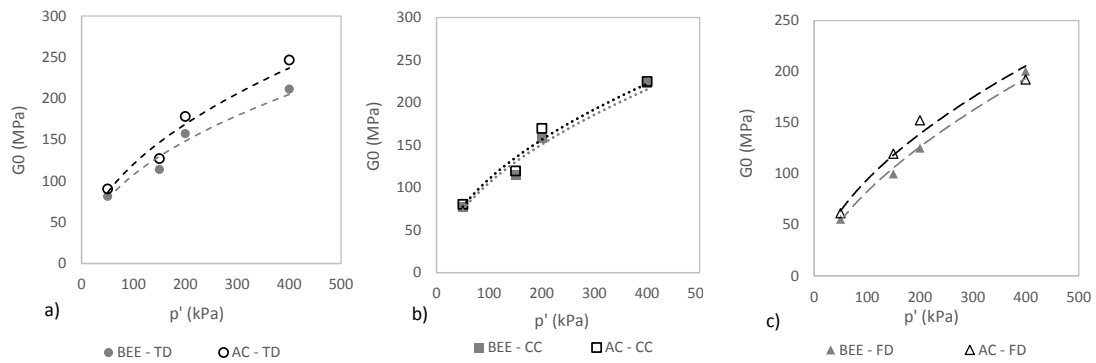


Figura 10 - Comparativo dos resultados de G_0 entre BEE e AC para os diferentes métodos de determinação de t_t .

Nas Figuras que se seguem, mostra-se os sinais elétricos obtidos com BEE e AC para as diferentes pressões de confinamento.

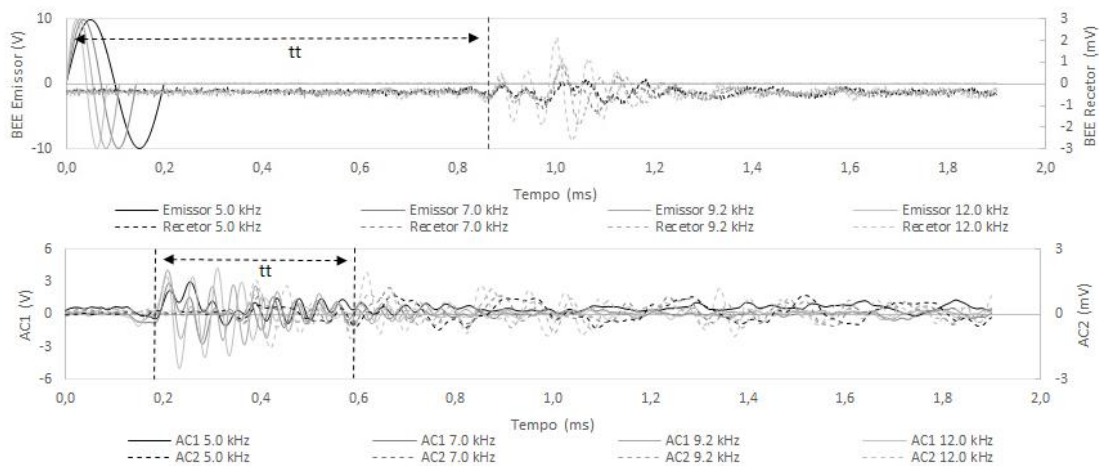


Figura 12 - Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de t_t para $p' = 50$ kPa.

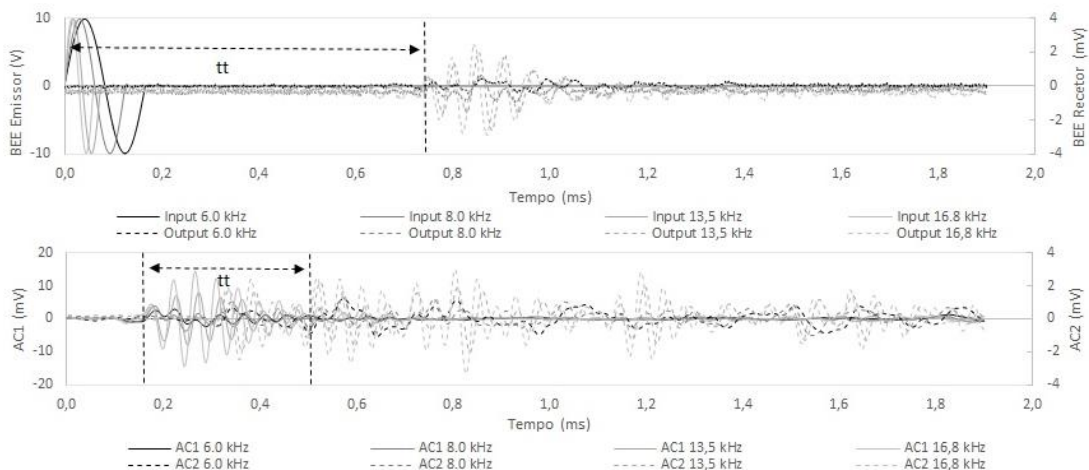


Figura 11 - Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de t_t para $p' = 100$ kPa.

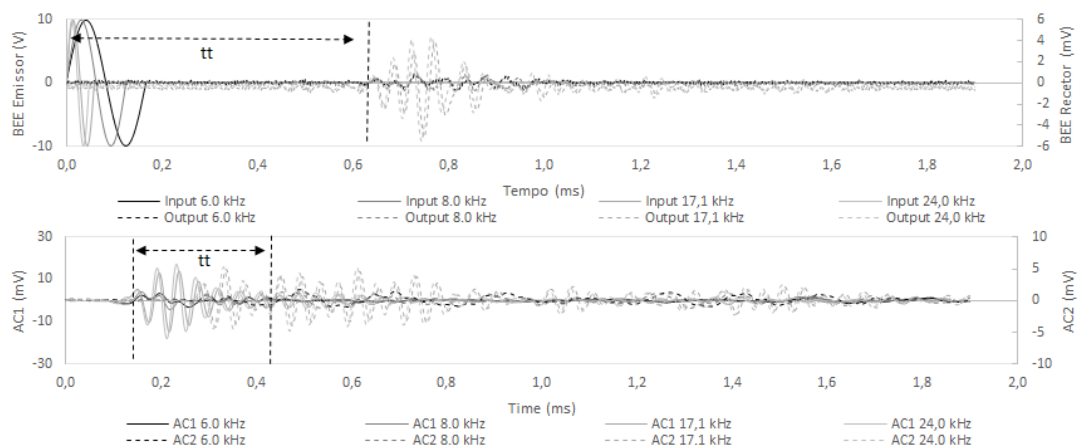


Figura 14 - Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de tt para $p' = 200\text{kPa}$.

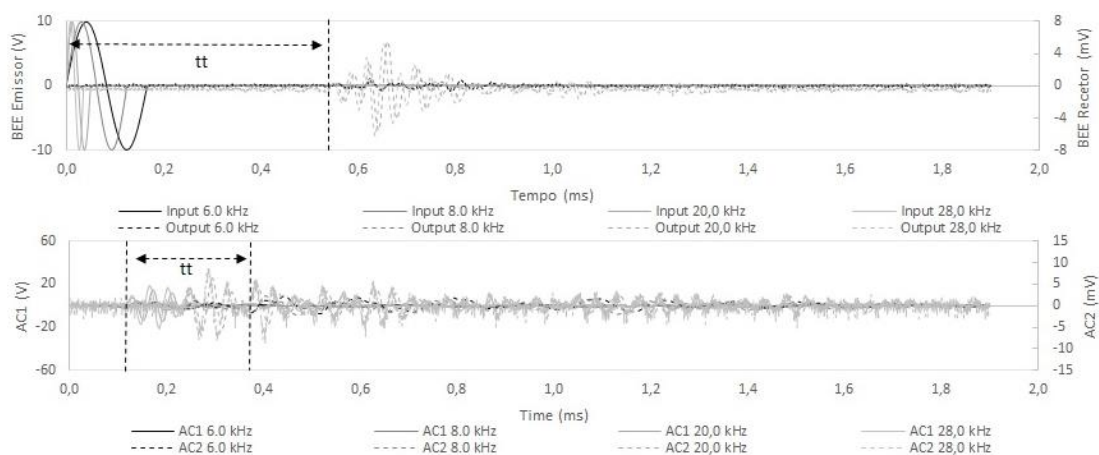


Figura 13 - Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de tt para $p' = 400\text{kPa}$.

Analisando a resposta do BEE recetor para cada nível de tensão, constatou-se que a amplitude do sinal recebido por este transdutor diminui com o aumento da tensão de confinamento. Observa-se ainda que há uma relação direta entre o aumento da pressão de confinamento e a gama de frequências de resposta ideal. O aumento da pressão de confinamento resulta diretamente num aumento da rigidez do material, o que provoca um aumento do limite superior da gama de frequências ideal. Tomando como exemplo as Figura 12 e Figura 14, e como referência a amplitude da primeira onda de corte, verifica-se que nas frequências mais baixas, existe uma redução de aproximadamente 40% da amplitude entre a primeira e a ultima fase de confinamento. Por outro lado, quando analisadas frequências mais elevadas, isto é, mais próximas das frequências ideais de resposta para pressões de confinamento mais elevadas, essa redução não é tão acentuada (aproximadamente 15%) (Figura 13 e Figura 14).

Em relação à amplitude dos sinais registados pelos AC, verifica-se que esta se mantém aproximadamente constante, para todos os estados de tensão. Este comportamento é mais evidente em AC1 (sensor mais próximo de BEE emissor), em especial para gamas de frequências mais altas. A distância ao BEE emissor parece também influenciar a qualidade dos sinais recebidos por AC2 uma vez que a amplitude dos sinais recebidos por AC1 é cerca de duas vezes e meia superior à amplitude dos sinais recebidos por AC2. Efetivamente, os sinais recebidos por AC2 registam uma influência de ondas P, em especial para gamas de frequências mais elevadas, o que dificulta a terminação de tt das ondas de corte.

Finalmente, quando comparadas as amplitudes dos sinais dos transdutores utilizados, verifica-se que a amplitude do sinal dos AC é superior à do BEE recetor. Analisando a Figura 12 e Figura 11, a amplitude do sinal de AC1 duplicou da primeira para as restantes fase de confinamento, mantendo-se depois, relativamente constante. Para AC2, os sinais recebidos são de amplitude ligeiramente inferior aos de AC1 (aproximadamente 50%), mas ainda assim 5 vezes e meia superiores aos sinais captados pelo BEE recetor,

quando utilizadas frequências mais baixas. Mais uma vez, esta diferença é atenuada com o aumento das frequências utilizadas, como resultado do aumento da rigidez. Este comportamento é mais evidente em AC2, onde a amplitude dos sinais recebidos se revelam mais sensíveis à relação frequência/pressão de confinamento.

Os valores de G_0 obtidos separadamente por BE e AC, nos diferentes métodos de interpretação, foram comparados com as expressões [5], [6] e [7] (Yamashita et al., 2009):

$$G = 14100f(e)\sigma_v^{0.4} \quad [5]$$

$$G = 11100f(e)\sigma_v^{0.44} \quad [6]$$

$$F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \quad [7]$$

Na Figura 15 a linha a tracejado corresponde à expressão [5] (distorções na ordem de grandeza $\gamma=10^{-6}$) sendo que, a linha a ponteados corresponde à expressão [6] (distorções na ordem de grandeza $\gamma=10^{-5}$). Da análise à Figura 10 podemos observar que, quer para os BE, quer para os AC, os resultados obtidos não diferem muito entre os diferentes métodos. Tal é confirmado na Figura 15, quando comparamos o mesmo método em diferentes sensores, onde existe semelhança nos resultados obtidos, em especial no método da correlação cruzada. Verifica-se também que, o método do varrimento de frequências apresenta valores de G_0 , em ambos os sensores, ligeiramente inferiores aos outros dois métodos. Todavia, esses valores quando comparados com às retas das expressões [5] e [6], são as que verificam melhor ajuste, em especial na pressão de confinamento máxima.

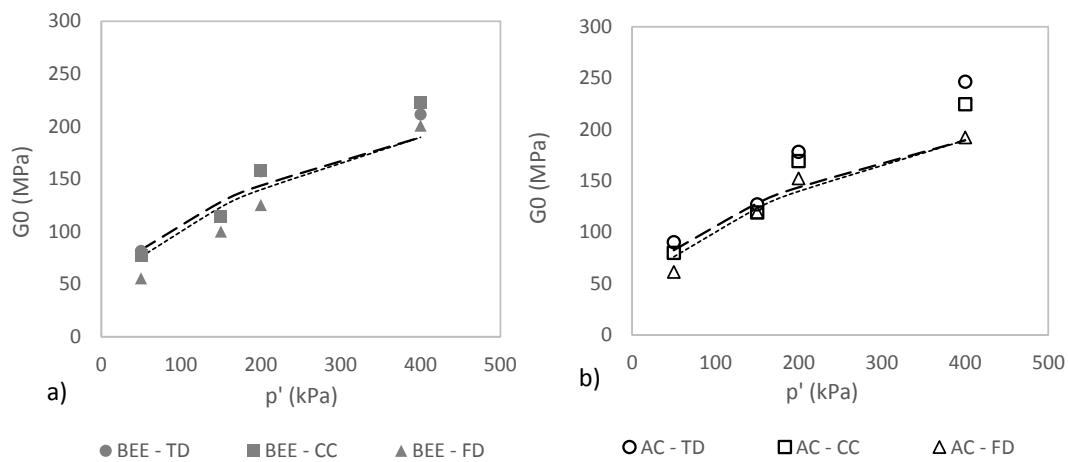


Figura 15 – Comparação entre os Valores de G_0 obtidos pelos diferentes métodos de interpretação de tt e expressões empíricas: a) Bender-extend Elements; b) Acelerómetros.

4 - CONCLUSÕES

Este trabalho pretendeu medir e interpretar a velocidade das ondas sísmicas com base no uso combinado de BE e AC numa câmara triaxial do tipo Stress-Path. Este sistema consiste essencialmente num BEE transmissor excitado através de um sinal elétrico – introduz ondas de corte no material a ensaiar – e num par de AC e BE recetor que detetam e registam as ondas de corte. A utilização desta técnica tinha como objetivo determinar G_0 , utilizando, simultaneamente, análises no domínio dos tempos e das frequências.

Ao nível do desempenho do sistema utilizado, a avaliação deste foi feita com recurso a ensaios triaxiais isotrópicos a uma areia, com medição de ondas S para diferentes tensões de confinamento. As diferenças observadas nos valores da velocidade das ondas S calculados com base nos t_t determinados pelos diferentes tipos de sensores (fazendo uso de diferentes metodologias de interpretação) foram pouco significativas. Todavia, para o caso particular de AC2, este apresentou sempre sinais muito contaminados por ondas P e possíveis reflexões de ondas S, o que criou dificuldades na determinação de t_t quando utilizada a metodologia TD. Este é um problema que pode estar relacionado com o acoplamento do AC à amostra, ao tipo de material ou até mesmo com geometria dos provetes. De futuro, um estudo fazendo variar a geometria dos provetes poderá dissipar algumas destas questões. Ainda assim, a qualidade dos sinais registados pelos AC, sobretudo para tensões de confinamento mais elevadas, confirma a pertinência e a utilidade da sua aplicação em ensaios de BE.

A utilização de diferentes metodologias de interpretação de t_t , permitiu comparar e dissipar algumas das dúvidas provocadas essencialmente pela qualidade dos sinais captados pelos sensores, o que atesta as recomendações feitas por Viana da Fonseca et al. (2009). A destacar a metodologia da CC entre sinais emitidos e recebidos pelos BEE 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.

Por último, quando comparamos os valores de G_0 obtidos nas diferentes metodologias, com as expressões empíricas [5] e [6], verificamos que de uma forma geral, a metodologia aqui utilizada responde à necessidade de aferir de uma forma correta e cuidada o tempo de propagação das ondas sísmicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto de investigação WaveSoil (PTDC/ECM/122751/2010) 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.
- Arroyo, M., Muir Wood, D., & Greening, P. D. (2003). Source near-field effects and pulse tests in soil samples. *Géotechnique*, 53(3), 337–345.
- Arroyo, Marcos. (2001). *Pulse tests in soil samples*. PhD Thesis. University of Bristol.
- Arroyo, Marcos, Pineda, J. A., & Romero, E. (2010). Shear wave measurements using bender elements in argillaceous rocks. *Geotechnical Testing Journal*, 33(6), 1–11.
- Arulnathan, R., Boulanger, R. W., & Riemer, M. F. (1998). Analysis of bender element tests. *Géotechnique*, 45(1), 149–154.
- Atkinson, J. H., & Sallfors, G. (1991). Experimental determination of soil properties. In *10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 915–956.).
- 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., 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.
- Chan, C.-M. (2011). Variations of shear wave arrival time in unconfined soil specimens measured with bender elements. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2), 461–468.
- Coop, M. R., & Alvarado, G. (2012). The use and interpretation of Bender Elements.
- 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. (2008). *The use of seismic wave velocities in the measurement of stiffness of residual soil*. PhD Thesis. University of Porto.
- Ferreira, C., Martins, J. P., & Gomes Correia, A. (2010). Implementação de bender-extenderelements e acelerómetros numa câmara triaxial Stress-Path. In A. Gomes Correia, T. Miranda, F. Martins, C. Ferreira, J. Tinoco, C. Alves, ... A. J. Roque (Eds.), *12th Portuguese National Congress of Geotechnics* (pp. 247–256). Guimarães: SPG and University of Minho.
- 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.
- Greening, P. D., & Nash, D. F. T. (2004). Frequency domain determination of G₀ using bender elements. *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 1–7.
- Ibrahim, A., Orense, R., & Pender, M. (2011). Determination of very small strain shear modulus of Auckland residual soils using bender elements. In *Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand: Building an Earthquake-Resilient Society.
- Jovic, V. (1992). The measurement and interpretation of small strain stiffness of soils, 31–54.
- 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.
- Jovičić, V., Coop, M. R., & Simić, M. (1996). Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests. *Géotechnique*, 46(2), 357–362.
- Lee, J., & Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1063–1070.
- 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*. PhD Thesis. Universidade do Minho.
- Rio, J. F. (2004). Sample Geometry effects on interpretation of results. In *WORKSHOP UCL* (p. 27).
- Rio, J. F. (2006). *Advances in laboratory geophysics using bender elements*. PhD Thesis. University College London.
- Sanchez-salinerio, I., Roesset, J. M., & Stokoe, K. H. (1986). *Analytical studies of body wave propagation and attenuation*. Austin.
- 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.
- Viggiani, G., & Atkinson, J. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 45(1), 149–154.
- 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.