

# Utilização de Bender Elements na determinação do Módulo de Distorção

Cláudio Pereira

Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), Guimarães, Portugal, [cpereira@civil.uminho.pt](mailto:cpereira@civil.uminho.pt)

António Gomes Correia

Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), Guimarães, Portugal, [agc@civil.uminho.pt](mailto:agc@civil.uminho.pt)

Cristiana Ferreira

Centro de Estudos da Construção (CEC), Porto, Portugal, [cristiana@fe.up.pt](mailto:cristiana@fe.up.pt)

Nuno Araújo

Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), Guimarães, Portugal, [nuno@civil.uminho.pt](mailto:nuno@civil.uminho.pt)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta a utilização de bender elements na determinação do módulo de distorção de uma areia. A amostra foi preparada para um determinado índice de vazios e ensaiada à compressão isotrópica até 400 kPa. Baseada na medição e interpretação de velocidades de ondas sísmicas, a técnica dos bender elements foi utilizada para a determinação do módulo de distorção no âmbito das muito pequenas deformações. Para melhorar a consistência dos resultados, foram utilizadas em simultâneo análises no domínio do tempo e da frequência na determinação do módulo de distorção. São feitas recomendações relativas à redução da subjetividade na determinação da velocidade de propagação das ondas sísmicas. A relação do módulo de distorção com a tensão normal média efetiva é avaliada e comparada com expressões empíricas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bender elements, módulo de distorção, domínio do tempo, domínio da frequência.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização de transdutores piezoelétricos, nos quais se destacam os bender elements (BE), para propagação de ondas de corte (ondas S), e os extender elements (EE), para ondas de compressão (ondas P), têm vindo a assumir-se como uma das técnicas laboratoriais mais comuns na determinação das propriedades dinâmicas do solo (Jovic, 1992, Alvarado e Coop, 2012).

A não-afetação da fábrica, da estrutura e das propriedades mecânicas dos materiais, no estudo de propriedades importantes como o estado de tensão, índice de vazios e anisotropia, são vantagens únicas inerentes a esta 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).

Anote-se que, no caso do módulo de distorção ( $G_0$ ), este assume particular importância como parâmetro de normalização em muitas correlações geotécnicas, sendo um dos poucos parâmetros possível de comparação com os resultados de ensaios geofísicos de campo (Gomes Correia, 2004).

Existem, todavia, algumas limitações relativas a alguma subjetividade na interpretação dos resultados, o que têm originado o aparecimento na literatura, de várias

técnicas de interpretação dos BE (Viggiani e Atkinson, 1995, Greening e Nash, 2004). Recentemente, Viana da Fonseca et al. (2009), Camacho-Tauta (2011) e Styler e Howie (2013) demonstraram que a combinação de métodos no domínio dos tempos e das frequências pode ajudar na análise e interpretação dos resultados de BE em laboratório.

Este trabalho pretende contribuir para a implementação e divulgação desta metodologia, na determinação da deformabilidade do solo, baseada em ensaios dinâmicos de laboratório. Para o efeito, utilizou-se uma câmara triaxial Bishop-Wesley, alterada por forma a poder acomodar um par de BE 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 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).

## 2 MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1 Equipamento

O sistema utilizado para a execução do ensaio triaxial com medição de ondas sísmicas comporta um par de BE “*T-shaped*” adaptados a uma câmara triaxial stress-path (Figura 1).

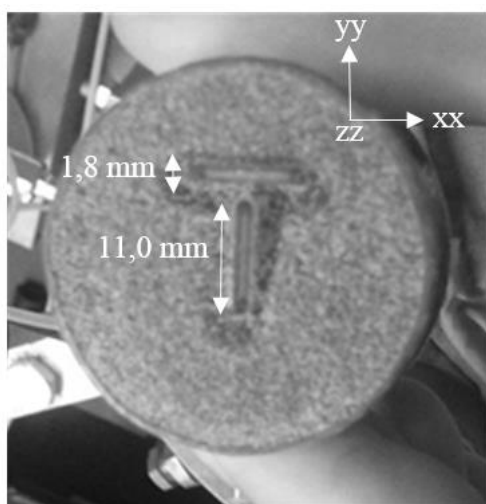


Figura 1. Bender elements “*T-shaped*” incorporados na câmara triaxial Bishop-Wesley.

Este tipo de transdutores permite medir em simultâneo - para uma determinada direção de

polarização - a velocidade das ondas S em diferentes direções de movimento das partículas sendo que, cada elemento possui as seguintes dimensões: 11 mm largura; 1,8 mm espessura total; 7 mm comprimento. Importa referir que após a introdução das pedras porosas, o comprimento de cravação dos BE é reduzido de 7 para 2 mm. O controlo da pressão na câmara é feito através de uma válvula proporcional pneumática com uma precisão global de  $\pm 0,5$  kPa.

No que toca ao sistema de BE instalado, o princípio de funcionamento é o seguinte. Com recurso a um gerador de funções (Huntingdon TG2511), o BE transmissor é excitado por um sinal elétrico, que induz vibrações de corte (ondas-S) que se propagam através do material a ensaiar. O BE recetor 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) (Figura 2).

Uma vez que as medições realizadas ocorrem na direção vertical de polarização (zz) – perpendicular às camadas de compactação do material -, é espectável a obtenção de valores similares nas direções xx e yy de movimento das partículas. Assim, o presente artigo apenas trata resultados obtidos na direção xx.

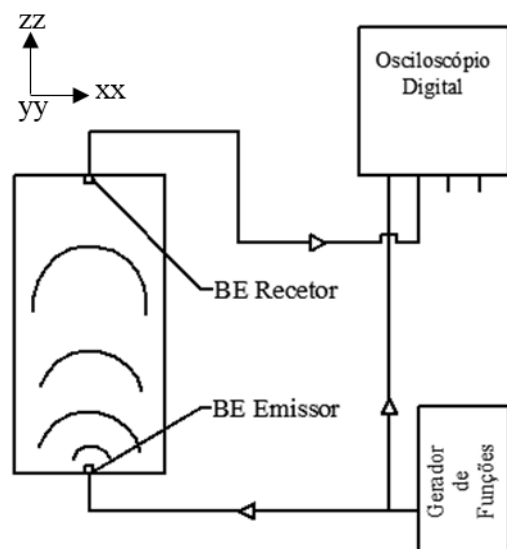


Figura 2. Configuração do sistema utilizado.

## 2.2 Preparação da amostra

O material escolhido para a realização do ensaio trata-se de uma areia monogranular, a areia Toyoura, proveniente do Japão. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica e índices físicos dessa areia.

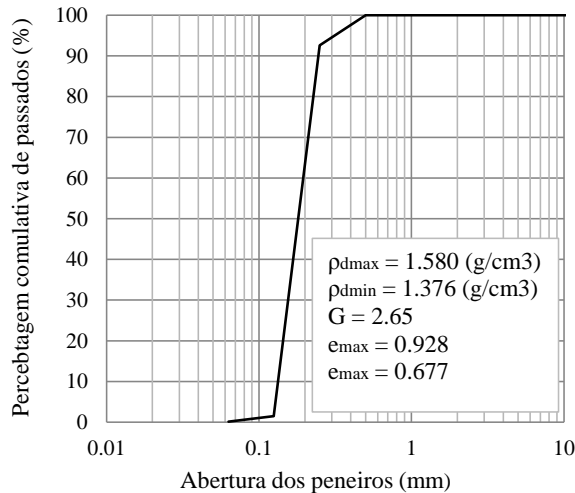


Figura 3. Curva granulométrica da areia de Toyoura.

A escolha deste material foi feita pelo facto de se tratar de um material de referência, frequentemente utilizado pela comunidade científica. Foi preparado um único provete, de acordo com a metodologia “Dry Tamping”, em cinco camadas (Yang e Gu, 2013). A Tabela 1 apresenta os índices físicos e geometria da amostra ensaiada.

Tabela 1. Índices físicos e geometria da amostra ensaiada.

Solo	e	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dr (%)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)
P9_V	0.72	15.2	83	76.25	34.54

A areia foi seca em 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 foi cuidadosamente vertido para o interior do molde com a membrana (Figura 4a). Durante este processo, foi mantida uma altura de queda constante, sendo cada camada posteriormente compactada, com um pistão. A altura final de cada camada é verificada com uma régua, a fim de garantir o índice de vazios pretendido. Este processo é repetido em todas as camadas.

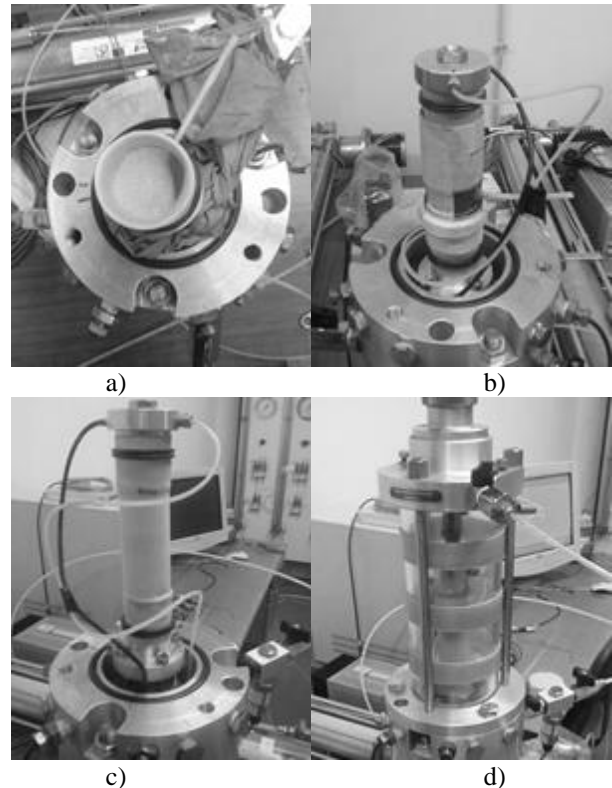


Figura 4. Preparação da amostra ensaiada.

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, a pressão no provete foi reduzida em 25 kPa (vácuo) e o molde

removido (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).

### 2.3 Procedimento de ensaio

A amostra foi submetida a testes sob 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 (TRF) (Figura 5);

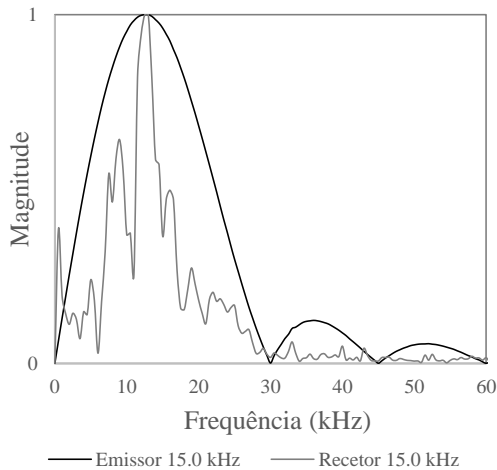


Figura 5. Exemplo de Transformadas de Fourier para impulso sinusoidal de 15.0 kHz com  $p' = 50\text{kPa}$ .

Geração de impulsos sinusoidais com frequências de 1-20 kHz, sendo adotado um período do sinal de 100 ms por forma a permitir tempo suficiente para a atenuação da resposta antes de ser gerado o próximo impulso;

Registo de um número mínimo de quatro impulsos e respetivas respostas, dispostos e analisados em simultâneo, com o objetivo de eliminar problemas como o ruído aleatório e interferência de ondas P que dificultam a identificação do começo da onda S (Figura 6);

Identificação do tempo de chegada com recurso ao método de medição direta da primeira chegada da onda. O tempo de propagação ( $tt$ ) 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);

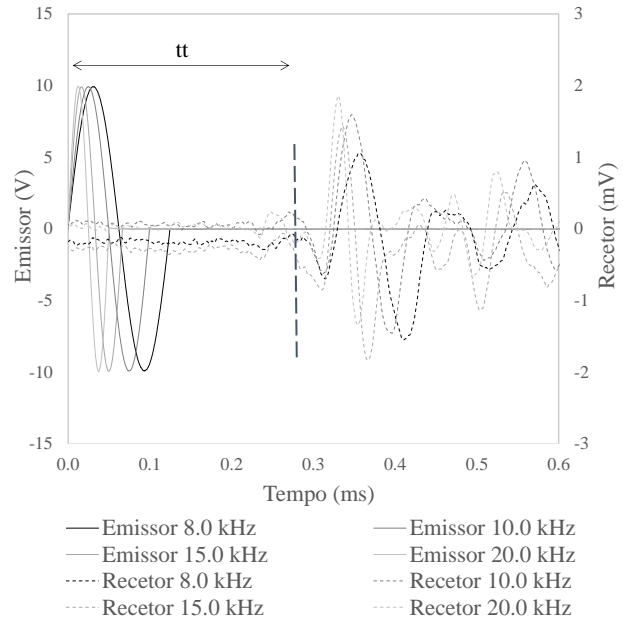


Figura 6. Exemplo da sobreposição de sinais e identificação de  $tt$  para  $p' = 100\text{kPa}$ .

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 equação (1),  $F$  e  $F^{-1}$  são a TRF e a inversa da TRF respetivamente sendo que o símbolo  $*$  representa o complexo conjugado da Transformada (Figura 7);

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

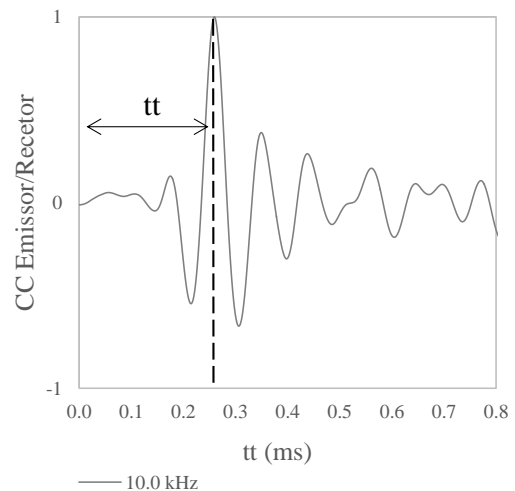


Figura 7. Correlação cruzada entre sinais de entrada e de saída para impulso sinusoidal de 10.0 kHz com  $p' = 150\text{kPa}$ .

A distância de propagação ( $L_{tt}$ ) é igual ao comprimento ponta-a-ponta entre BE, isto é, a altura da amostra menos duas vezes o comprimento dos BE;

Determinação da velocidade das ondas de corte ( $V_s$ ) e de  $G_0$  com base nas equações (2) e (3), onde ( $\rho$ ) 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 10 V (Figura 8);

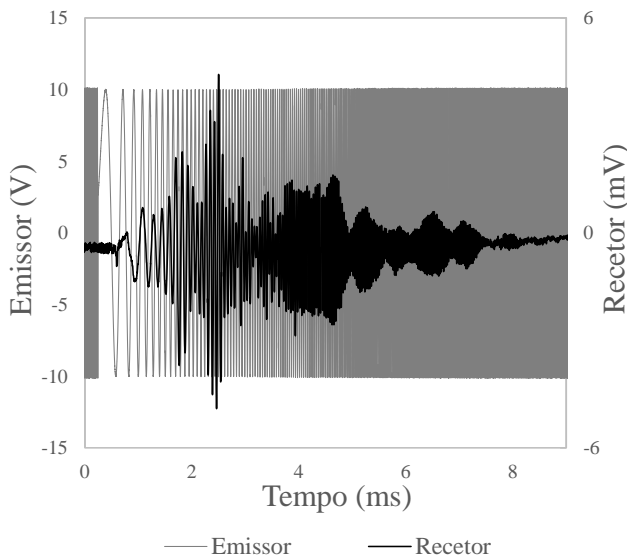


Figura 8. Varrimento sinusoidal linear com frequências entre 1-50 kHz com  $p' = 50$  kPa.

O  $tt$  é determinado fazendo uso da função de transferência entre os sinais (Wrapped phase angle ( $\phi$ )) (Figura 9), e da função de coerência – avalia a “qualidade” da função de transferência. Para isso é necessário realizar um procedimento designado “Unwrapped” isto é, remover os “saltos” da função de transferência;

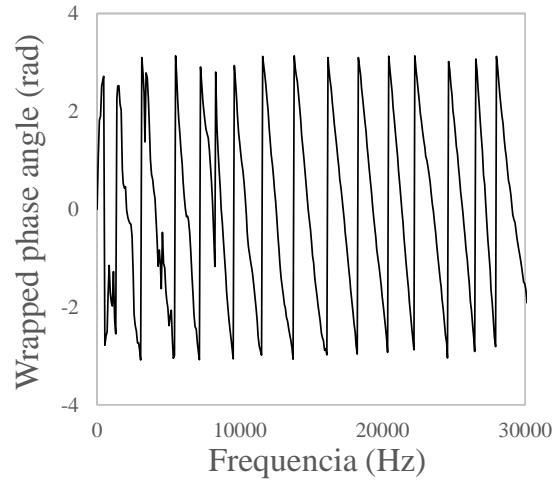


Figura 9. Wrapped phase angle ( $\phi$ ) para o varrimento sinusoidal linear com frequências entre 1-50 kHz com  $p' = 50$  kPa.

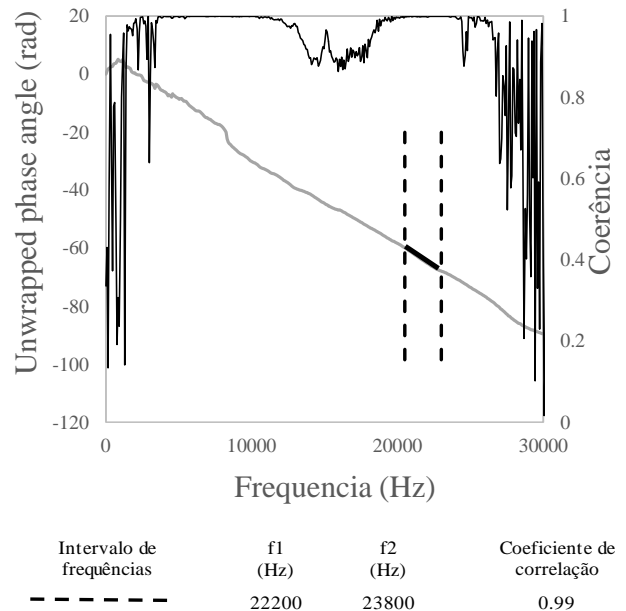


Figura 10. Relação entre a Coerência e o Unwrapped phase angle para o varrimento sinusoidal linear com frequências entre 1-50 kHz com  $p' = 50$  kPa.

O resultado desta operação é apresentado na Figura 10. 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).

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

### 3 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo dos valores do módulo de distorção ( $G_0$ ) obtidos nas diferentes fases de confinamento, em função da metodologia de determinação da velocidade de ondas sísmicas (ondas S).

Tabela 2. Resumo comparativo dos resultados de  $G_0$  obtidos com base na medição da velocidade de ondas sísmicas (ondas S).

Método de determinação de tt	Valor de $G_0$ (MPa)			
	Tensão de Confinamento (kPa)			
	50	100	200	400
TD	73	94	132	171
CC	64	86	115	161
FD	52	73	97	141
Diferença entre TD e CC (%)	14	10	14	6
Diferença entre TD e FD (%)	41	29	36	21
Diferença entre FD e CC (%)	24	17	19	14

Com exceção da determinação do tempo de propagação das ondas de corte (tt) - diretamente relacionado com a confiança do valor  $G_0$  -, a interpretação dos resultados dos BE é simples. Conforme referido anteriormente, o tempo de propagação pode ser estimado empregando várias técnicas de interpretação e análise de sinal.

Da análise à Tabela 2 verifica-se que, para cada tensão de confinamento, os valores mais elevados de  $G_0$  correspondem ao método TD. Por oposição, o método FD apresenta valores mais reduzidos de  $G_0$ . Assim sendo, não é de estranhar a maior diferença de valores de  $G_0$  observada entre estes dois últimos métodos, nomeadamente para a tensão de confinamento de 50 kPa. Este comportamento pode ser justificado com base em estudos anteriores, os quais indicam que a utilização de técnicas no domínio dos tempos (método TD) aparentam sobrestimar a velocidade das ondas de corte (ondas-S) e conseqüentemente, o valor de  $G_0$  (Ferreira, 2003).

Por outro lado, no que se refere às técnicas de interpretação de sinal no domínio das

frequências (método FD), o facto de os sinais (emitido e recebido) não serem da “mesma natureza” pode originar erros de interpretação, acentuando e justificando esta diferença de valores de  $G_0$  obtidos, comparativamente aos restantes métodos (Ferreira, 2008 e Camacho-Tauta, 2011). Contudo, dada a subjetividade inerente à interpretação dos BE e às diferenças entre metodologias de interpretação, considera-se aceitável a variação dos resultados obtidos.

Os valores de  $G_0$  obtidos nos diferentes métodos de interpretação, foram comparados com as equações (5) (distorções na ordem de grandeza  $\gamma=10^{-6}$ ) e (6) (distorções na ordem de grandeza  $\gamma=10^{-5}$ ) (Yamashita, Kawaguchi, e Nakata, 2009) (Figura 11).

$$G = 14,1 \times f(e) \times p^{0,4} \quad (5)$$

$$G = 11,1 \times f(e) \times p^{0,44} \quad (6)$$

$$f(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (7)$$

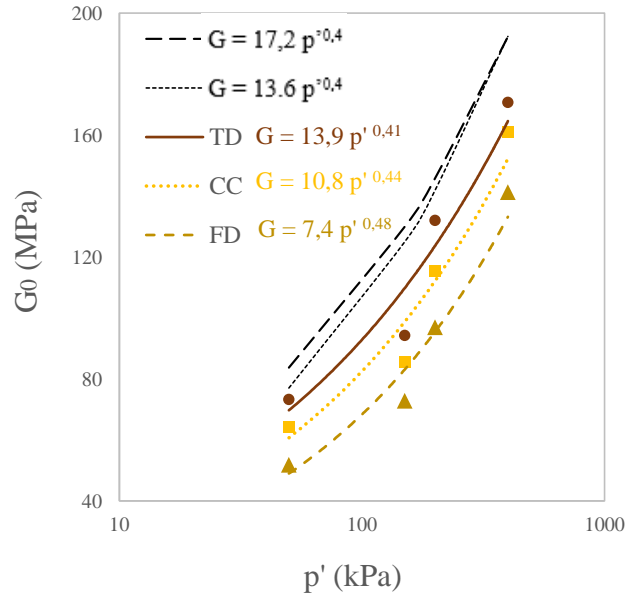


Figura 11. Comparação entre os Valores de  $G_0$  obtidos pelos diferentes métodos de interpretação de tt e expressões empíricas.

Da análise à Figura 11, podemos observar que é o método TD que verifica melhor ajuste às equações (5) e (6), em praticamente todas as pressões de confinamento.

A equação (8) é construída na forma das equações (5) e (6) e não tem homogeneidade dimensional; os valores numéricos dos parâmetros  $A$  e  $m$  dependem assim do sistema de unidades utilizado (Camacho-Tauta, 2012).

$$G = A \times f(e) \times p^m \quad (8)$$

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, consideram-se admissíveis os resultados obtidos.

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho pretendeu ser um contributo à implementação e divulgação da medição e interpretação da velocidade das ondas sísmicas com base na utilização de Bender Elements (BE). Esta metodologia consiste num BE transmissor excitado através de um sinal elétrico – introduz ondas de corte no material a ensaiar – e num BE recetor que deteta e regista as ondas de corte. A sua utilização assume como principal objetivo, a determinação de  $G_0$  utilizando, simultaneamente, análises no domínio dos tempos e das frequências.

Todavia, em função da necessidade inerente de julgamento por parte do utilizador, esta metodologia permanece envolta em contínua discussão. Assente em três critérios - identificação da frequência de melhor resposta; registo de um número mínimo de quatro sinais; utilização de várias técnicas de interpretação de sinal -, o procedimento utilizado neste trabalho tem por objetivo reduzir a subjetividade na determinação do tempo de propagação ( $t_t$ ).

A utilização de diferentes metodologias de interpretação permitiu comparar e dissipar algumas das dúvidas provocadas essencialmente pela qualidade dos sinais recebidos. A destacar o método da CC entre sinais emitidos e recebidos 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 avaliação prévia da qualidade dos sinais de resposta, 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 o módulo de distorção ( $G_0$ ).

#### 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., e Coop, M. R. (2012). On the performance of bender elements in triaxial tests. *Geotechnique*, 62(1), 1–17.
- 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.
- 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*. University of Porto.
- Gomes Correia, A. (2004). Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas. *Geotecnia*, 103–122.
- Greening, P. D., e Nash, D. F. T. (2004). Frequency domain determination of  $G_0$  using bender elements. *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 1–7.
- Jovic, V. (1992). The measurement and interpretation of small strain stiffness of soils, 31–54.
- Rio, J. F. (2006). *Advances in laboratory geophysics using bender elements*. University College London.
- Stokoe, K. H., e 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., e Howie, J. A. (2013). Continuous monitoring of Bender Element shear wave velocities during triaxial testing. *Geotechnical Testing Journal*.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., e 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., e Atkinson, J. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 45(1), 149–154.
- Yamashita, S., Kawaguchi, T., e Nakata, Y. (2009). Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements. *Soils and Foundations*, 49(4), 631–650.
- Yang, J., e Gu, X. (2013). Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size? *Géotechnique*, 63(2), 165–179.