

TRIAXIAIS DE PRECISÃO PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE

PRECISION TRIAXIAL TESTS TO DETERMINE DEFORMABILITY CHARACTERISTICS

Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*
Reis Ferreira, Sandra M., *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal,*
sandraferreira@civil.uminho.pt
Faria Araújo, Nuno, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, nuno@civil.uminho.pt*

RESUMO

A presente comunicação apresenta várias técnicas de instrumentação local para medição das deformações verticais e radiais de provetes triaxiais cilíndricos e prismáticos, relatando vantagens e inconvenientes das mesmas. Incluem-se nestas técnicas: LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), LDT (*Local Deformation Transducers*), efeito de Hall e transdutores piezoelétricos. Apresentam-se resultados experimentais obtidos sobre um mesmo solo com recurso a estes diferentes tipos de instrumentação na perspectiva de comparar os resultados obtidos, e mostrar a sua influência, muito particularmente, nas curvas de degradação do módulo com o nível de deformação, varrendo o domínio das pequenas às médias deformações. Além disso, ilustram-se também resultados obtidos em diferentes tipos de materiais recorrendo ao uso de LDT's implementados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

ABSTRACT

This paper presents several techniques of local instrumentation to measure vertical and radial strains in the triaxial cylindrical or prismatic samples. It also refers the advantages or disadvantages of each technique. The techniques includes: LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), LDT (*Local Deformation Transducers*), Hall effect and piezoelectric transducers. Experimental results obtained in a same specimen of soil are presented by using these different kinds of instrumentation. The results are compared showing the influence of each kind of instrumentation, in particularly on the degradation curves covering the small to medium strains. Furthermore, results are also illustrated for different types of materials using LDT's implemented in the Civil Engineering Laboratory of University of Minho.

1. INTRODUÇÃO

Na análise do comportamento dinâmico dos solos utiliza-se muito frequentemente, como parâmetro de normalização, o módulo de deformabilidade ou de distorção inicial, correspondente a um nível de deformação da ordem de 10^{-6} . Estes módulos podem ser obtidos "in situ" através de ensaios geofísicos e em laboratório através de ensaios em coluna ressonante. Esta prática laboratorial, utilizada ao longo de várias décadas, tem sido recentemente questionada, nomeadamente, no que se refere à influência da velocidade do carregamento, ou de deformação, no módulo de deformabilidade e, muito particularmente, no coeficiente de amortecimento (Gomes Correia, 1999). Neste contexto, os ensaios triaxiais de precisão passaram a competir com o ensaio de coluna ressonante e daí, a sua grande popularidade actual nos laboratórios de investigação.

A necessidade de medições mais precisas, no domínio das muito pequenas a pequenas deformações, conduziu nos últimos 20 anos à introdução de novos sistemas de medida capazes de fornecerem valores com precisão na gama das deformações pretendida e, muito particularmente, na gama das pequenas deformações. Refira-se que os procedimentos convencionais para determinar as deformações durante os ensaios triaxiais são baseados em medidas externas. Esta prática é inadequada, particularmente se o objectivo é investigar a rigidez do solo no domínio das pequenas deformações (ver Figura 1). De facto, as medidas externas introduzem erros que só podem ser minimizados se as deformações axiais e radiais forem medidas internamente (localmente no provete) na parte central do provete (Gomes Correia, 1985).

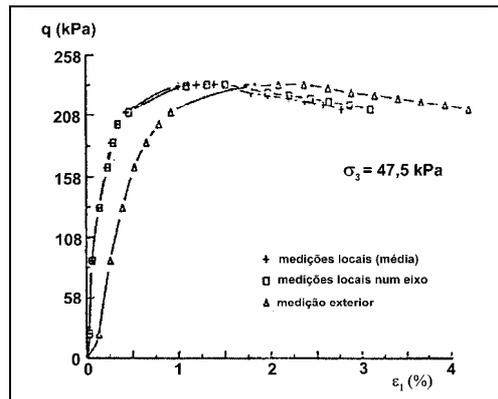


Figura 1- Curvas obtidas com medições externas e internas (depois de Gomes Correia, 1985).

Dentro das várias técnicas de instrumentação local desenvolvidas para medição das deformações de provetes triaxiais, quer cilíndricos, quer prismáticos, referem-se aqui algumas das mais utilizadas nos laboratórios de investigação: LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), LDT (*Local Deformation Transducers*), efeito de Hall e transdutores piezoeléctricos. Os electrólitos e os transdutores de proximidade (Jardine et al., 1984, Gomes Correia, 1985) são também transdutores de deslocamento muito utilizados. Contudo, estes não serão abordados nesta comunicação.

2. METROLOGIA DOS TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO

2.1. LVDT (*Linear variable differential transformer*)

LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) é um transdutor de deslocamento linear que funciona através do princípio da indutância mútua. Este tipo de transdutor de deslocamento consiste em três enrolamentos, um primário e dois secundários equipados com um núcleo móvel de elevada permeabilidade magnética (ver Figura 2). Ao aplicar-se uma tensão no enrolamento primário este induz uma tensão nos enrolamentos secundários e o sinal eléctrico produzido é proporcional à posição relativa que o núcleo ocupa nos enrolamentos. A tensão induzida nos enrolamentos secundários é relacionada directamente com a deformação sofrida pelo provete, através de uma relação linear.

Com estes transdutores de deslocamento conseguem-se medir deformações da ordem dos 10^{-6} , pelo que se consegue medir o módulo de elasticidade dos solos, que ocorre normalmente até níveis de deformação da ordem dos 5×10^{-6} . Na Figura 2 apresenta-se o esquema de funcionamento e a montagem dos LVDT's quando utilizados em ensaios triaxiais de precisão, para a medição das deformações axiais (Brown et al., 1980; Jardine et al., 1984, Gomes Correia, 1985, Gomes Correia et al., 1996).

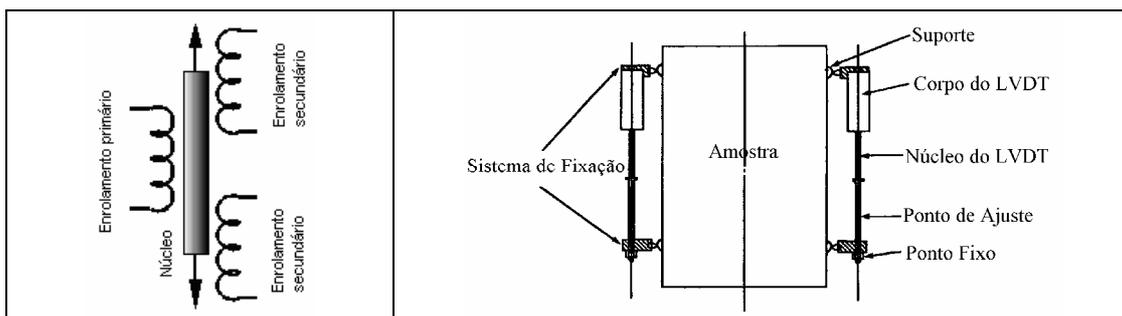


Figura 2- Esquema de funcionamento e montagem de LVDT's em ensaios triaxiais de precisão.

As vantagens de utilização destes transdutores de deslocamento são inúmeras. Dado que são transdutores indutivos, são menos sensíveis à variação de temperatura, e menos afectados pelo ruído eléctrico do que os transdutores do tipo resistivo. São transdutores com grande estabilidade no sinal de saída e quando correctamente utilizados medem com precisão o deslocamento em todas as gamas de deformações de interesse corrente na engenharia geotécnica. Os erros associados nas leituras de deslocamento devidos à não verticalidade do transdutor são pequenos. Estudos efectuados por Cuccovillo e Coop (1997) mostraram que uma inclinação de 8° no transdutor se traduz num erro de apenas 1% na leitura do deslocamento.

Os principais inconvenientes na utilização destes transdutores advêm da sua natureza pesada o que conduz à dificuldade em fixá-los ao provete. O primeiro sistema de fixação a ser desenvolvido para este transdutor foi um anel (Figura 3). O anel fixa simultaneamente todos os LVDT's, funcionando o sistema como um conjunto. No Instituto Superior Técnico (IST), de forma a se encontrar um sistema de mais fácil fixação, que o proposto por Paute et al. (1987), foram desenvolvidos dois sistemas, um usando simplesmente anéis individuais para cada transdutor (Marques, 2003), e outro recorrendo a molas (Reis Ferreira, 2003). Na Figura 3 apresenta-se uma fotografia dos LVDT's existentes no IST, utilizados na medição de deformações axiais, os sistemas de fixação desenvolvidos (ao centro e no lado esquerdo da figura) e o anel utilizado inicialmente (lado direito da figura).

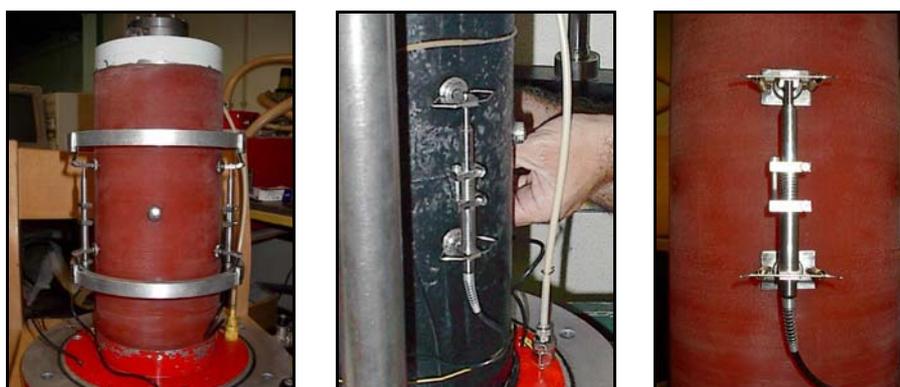


Figura 3- Sistemas de fixação para os LVDT's na medição da deformação axial (IST).

Relativamente aos três sistemas de fixação pode dizer-se, que o anel é o sistema de colocação mais difícil e quando os provetes são submetidos a deformações maiores que as muito pequenas a pequenas, não há a garantia que este sistema não interfira com o comportamento do material. Pelo contrário, os outros dois sistemas podem ser utilizados em todas as gamas de funcionamento do LVDT, pois cada um é fixo isoladamente. O sistema de molas tem como vantagem em relação ao sistema de anéis individuais, uma fixação mais fácil ao provete, pelo que a "qualidade" das medidas de deformação não depende da experiência ou da perícia do utilizador.

2.2. LDT (Local deformation transducers)

LDT (*Local Deformation Transducers*) é um transdutor de deslocamento do tipo resistivo e foi desenvolvido no Institute of Industrial Science, Universidade de Tóquio, por Goto et al. (1991), Tatsuoka et al. (1999). Este transdutor é constituído por uma tira delgada e comprida de bronze e fósforo, sendo a meio da tira colocada uma ponte de Wheatstone (ver Figura 4). As deformações aplicadas aos provetes causam deslocamentos relativos dos pontos de fixação da tira e desta forma o sinal de saída relaciona-se com a deformação do provete através de uma função polinomial de 2º grau (ver Figura 5). Com estes transdutores consegue-se medir deformações da ordem dos 10^{-6} . Na Figura 4 apresenta-se o esquema de funcionamento dos LDT's e ainda fotografias onde se mostra em pormenor os transdutores utilizados na Universidade do Minho (UM) para a medição das deformações axiais e radiais em provetes prismáticos e cilíndricos.



Figura 4 – Esquema de funcionamento e pormenor da utilização dos LDT's (UM).

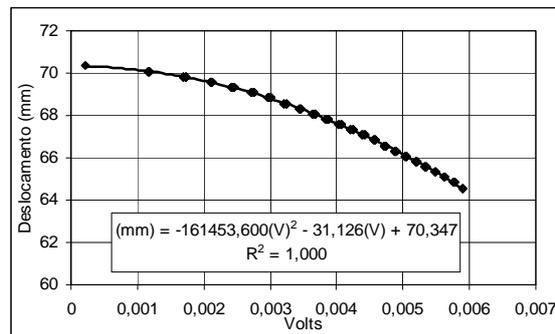


Figura 5 – Exemplo da relação entre o deslocamento e o sinal de saída de um LDT.

Algumas das muitas vantagens destes transdutores são a sua simplicidade, o seu baixo custo e a facilidade de fixação ao provete. Podem ainda ser utilizados em água se as ligações eléctricas forem bem isoladas. Além disso, a ponte de Wheatstone pode ser configurada para compensar as flutuações de temperatura. Hoque et al. (1997), ao avaliarem a performance dos LDT's, concluíram que quando usados num carregamento monotónico a avaliação da rigidez no domínio das muito pequenas a pequenas deformações é subestimada no máximo em 2%.

Apesar das muitas vantagens os LDT's têm algumas limitações, tal como, gama de operação limitada, o que faz com que estes transdutores não possam ser utilizados quando se pretende estudar o comportamento dos solos em todas as gamas de deformação. Refira-se, contudo, que a deformação máxima em que o transdutor pode funcionar é função das propriedades elásticas da tira e da resistência do contacto entre a membrana e a articulação. Para níveis de deformação elevados podem-se gerar tensões elásticas excessivas nas articulações do sistema de fixação e haver transferência destas ao provete. Desta forma o transdutor pode interferir com o comportamento do solo (Scholey et al., 1995).

2.3. Efeito de Hall

O transdutor de efeito de Hall foi desenvolvido por Clayton et al. (1986) na Universidade de Surrey. O nome deste transdutor deve-se à sua forma de funcionamento, uma vez que funciona através do efeito de Hall. Este efeito é um fenómeno electromagnético que é observado quando uma placa metálica percorrida por uma corrente (I) é colocada num campo magnético (B) uniforme e constante de direcção perpendicular à da corrente. Sobre os portadores de carga positivos exercer-se-á uma força magnética, designada de força de Lorentz, com direcção perpendicular quer à da corrente quer à do campo magnético. As cargas vão acumular-se na face da placa metálica, originando um campo eléctrico numa direcção perpendicular à da corrente e à do campo magnético. O resultado final será um estado de equilíbrio e a diferença de potencial associada ao campo eléctrico é conhecida por tensão de Hall.

Normalmente admite-se para estes transdutores uma relação linear entre o sinal de saída e a deformação. Contudo, estudos recentes (Dufour Laridan, 2001) na École Centrale Paris (ECP) revelam que a relação que melhor se ajusta à calibração do transdutor é uma função polinomial de 3º grau. A utilização destes transdutores para a medição das deformações radiais é conseguida através de um anel articulado desenvolvido por Clayton et al. (1989) (ver Figura 6).

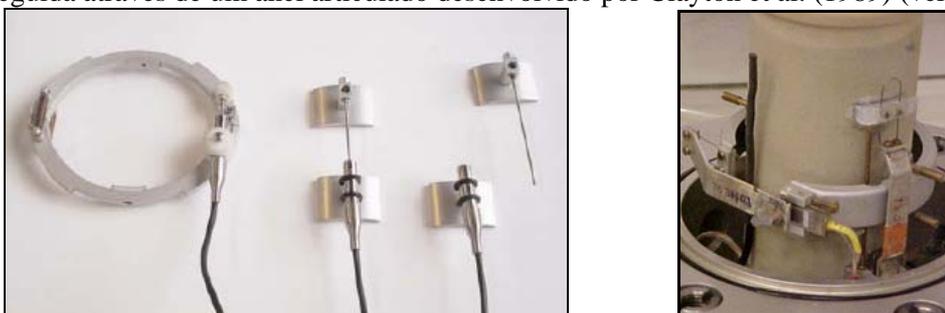


Figura 6 – Transdutor efeito de Hall (École Centrale Paris).

As maiores vantagens deste transdutor são a sua simplicidade, baixo custo e a estabilidade do sinal de saída. Com este transdutor podem ser medidas deformações da ordem dos 2×10^{-5} , não se conseguindo por isso o estudo dos materiais no domínio das muito pequenas deformações (Scholey et al., 1995).

As principais limitações do transdutor de efeito de Hall são a sua limitada gama de operação e a grande sensibilidade ao ruído eléctrico e às variações de temperatura. Dufour-Laridan (2001), ao fazer um estudo extenso sobre as fontes de erro destes transdutores identificou como principal a variação da temperatura. Este problema foi em muito melhorado quando substituiu os ímanes de ferrite, inicialmente propostos por Clayton et al. (1986), por ímanes Sm-Co (Samário-Cobalto). Segundo o autor, com a substituição dos ímanes consegue-se medir deformações da ordem dos 5×10^{-6} (valor bastante inferior ao inicialmente conseguido, 2×10^{-5}).

2.4. Transdutores Piezoeléctricos

Dentro dos diferentes tipos de transdutores piezoeléctricos há quatro tipos, a saber: *bender elements*, *shear-plates*, *compression transducer* e *extender elements*. Os primeiros são utilizados para a propagação de ondas de corte (S) e os segundos para a propagação das ondas de compressão (P).

Genericamente um *bender element* ou transdutor de flexão é um transdutor piezocerâmico duplo constituído por duas placas piezocerâmicas finas, rigidamente ligadas a uma lâmina metálica

central e aos eléctrodos nas faces exteriores. A ligação das placas cerâmicas em relação às suas direcções de polarização deve ser tal que origine um movimento conjunto de flexão, de modo a propagar ondas S durante a sua deformação. Os *extender elements*, ou transdutores de extensão, são transdutores semelhantes aos *bender elements*, constituídos igualmente por duas placas piezocerâmicas; contudo, deformam-se em extensão-compressão, daí gerando ondas P.

As *shear-plates* (placas de corte) são constituídas por um elemento piezocerâmico simples, de forma prismática, polarizado na direcção longitudinal. As deformações geradas no elemento, quando se introduz um potencial eléctrico nos terminais, são do tipo distorcional produzindo ondas S. Os *compression transducers* (transdutores de compressão), são constituídos por um único elemento piezocerâmico cilíndrico polarizado na direcção da sua espessura. A aplicação de um potencial eléctrico induz deformações de compressão-extensão, permitindo assim a propagação das ondas P.

Hoje em dia está em desenvolvimento a construção de um transdutor híbrido, isto é, um transdutor que possa ser utilizado para a propagação dos dois tipos de onda (S e P) designado de *bender/extender element* (Ferreira, 2003).

O princípio físico de funcionamento destes transdutores é muito simples, pois consiste em gerar simplesmente uma onda no solo e medir a velocidade de propagação dessa onda. A velocidade de propagação das ondas é relacionada directamente com o módulo de distorção (G) e com o módulo de deformabilidade (E) através das seguintes equações: $G = \rho V_s^2$ e $E = \rho V_p^2 (1 - 2\nu)(1 + \nu)/(1 - \nu)$, onde V_s designa a velocidade para as ondas de corte e V_p velocidade das ondas de compressão. Na Figura 7 apresenta-se um esquema e uma fotografia da montagem de alguns dos transdutores piezoeléctricos utilizados nos ensaios triaxiais.

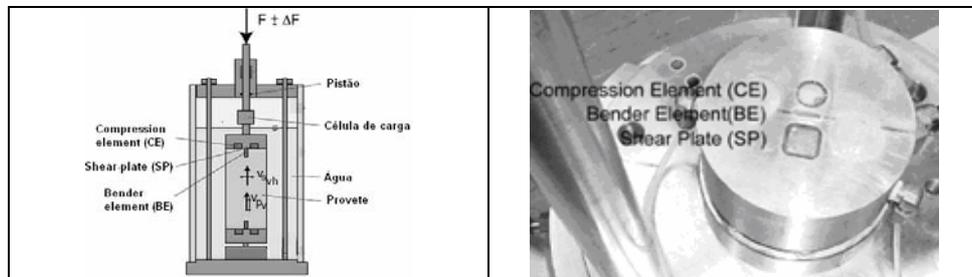


Figura 7 – Montagem de alguns transdutores piezoeléctricos na câmara triaxial (depois de Wichtmann et al., 2004).

As vantagens da utilização destes transdutores são o seu baixo custo, permitem medidas de rigidez de forma não destrutiva ao longo de um ensaio para diversas condições de solicitação em tensão e em deformação e a amplitude de deformação é baixa (de 10^{-7} a 10^{-5}). Com estes transdutores, uma vez que é possível medir as velocidades de propagação segundo diversas direcções de propagação e polarização, consegue-se avaliar o comportamento anisotrópico inerente e induzido pela trajectória de tensões do ensaio (Bellotti et al., 1996).

As desvantagens da utilização destes transdutores prendem-se sobretudo com a incerteza da medição das leituras. Para a determinação da velocidade de propagação das ondas é necessário conhecer-se com muito rigor, por um lado a distância percorrida pela onda, por outro o seu tempo de percurso. A distância a considerar para o trajecto das ondas é questionável embora, vários estudos (Dyvik et al., 1985, Viggiani et al., 1995), tenham mostrado que no caso dos *bender* ou os *extender elements* a distância que deverá ser utilizada para os cálculos será aquela que se refere à distância entre os transdutores. No caso dos outros transdutores (*shear-plates* e

compression transducers) a distância a considerar será o comprimento total do provete. A determinação exacta do tempo de percurso é mais problemática, porque para além de existirem efeitos marginais associados à emissão de ondas sísmicas (efeito de vizinhança) que se sobrepõem à onda originalmente gerada, os transdutores de recepção têm geralmente capacidade para captar, para além do sinal emitido, muitas outras frequências (ruído ambiente, a reflexão das ondas nas fronteiras, etc.). A combinação destes factores associada à forte atenuação da magnitude da onda durante a propagação e o seu carácter não unidimensional dificultam consideravelmente a tarefa de determinação do tempo de propagação (Ferreira, 2003).

Relativamente à fixação dos transdutores piezoeléctricos pode-se dizer que a natureza intrusiva dos *bender* ou dos *extender elements* é por vezes vista como uma desvantagem, uma vez que há a necessidade da sua penetração nos provetes, o que pode provocar a perturbação localizada ou o eventual arrastamento dos grãos. Por outro lado, os outros transdutores com uma única placa (*shear-plates* ou *compression transducers*) podem condicionar o bom contacto na amostra e dificultar ou até mesmo inviabilizar a sua montagem e utilização noutras posições que não sejam as de topo e base do provete.

3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS DIFERENTES TRANSDUTORES

Pelo acima exposto verifica-se que uns transdutores são mais adequados para um determinado tipo de solo do que outros. Lo Presti et al. (2001), analisando um vasto conjunto de resultados obtidos com LDT's e LVDT's, concluíram que os primeiros são preferíveis para o estudo de solos duros (cascalho e areias) enquanto que os segundos são preferíveis no estudo de argilas. Este facto deve-se à natureza pesada dos LVDT's que dificulta em muito a fixação do transdutor ao provete. Ainda segundo os mesmos autores, a comparação das performances dos LVDT's, LDT's e efeito de Hall revela que as medidas efectuadas com este último têm a menor resolução e a maior dispersão, comparativamente com os outros dois transdutores de deslocamento. Também mostraram que os transdutores de efeito de Hall têm fraca estabilidade quando as medidas são realizadas a uma temperatura de 20+2°C e são os mais afectados pelo ruído eléctrico. Scholey et al. (1995), ao avaliarem a performance dos transdutores de efeito de Hall, referiram que estes não são recomendáveis quando se pretende estudar o comportamento de argilas moles, ou a influência de baixos níveis de tensão no comportamento dos solos.

Na Figura 8 apresentam-se as curvas de degradação do módulo de deformabilidade secante, E_{sec} , obtidas por Hadiwardoyo (2002) para um solo residual granítico designado de Areia de Perafita utilizando quatro transdutores de deslocamento diferentes: LVDT's existentes no IST, efeito de Hall (convencional e o melhorado por Dufour Laridan, 2001- assinalado na figura com DL) e LDT's, ambos existentes na ECP. Desta figura, podem-se retirar algumas conclusões: os LVDT's existentes no IST, ou o efeito de Hall melhorado existente na École Centrale Paris têm uma maior precisão nas medidas de deformação; o transdutor de efeito de Hall convencional apresenta a maior dispersão dos resultados; os módulos iniciais só podem ser obtidos através dos LVDT's ou do efeito de Hall melhorado.

É de salientar que actualmente na ECP, após melhoramentos realizados no sistema de aquisição, se consegue uma maior precisão nas medidas de deformação obtidas com os LDT's (ver Figura 9-d, Coronado Garcia, 2005), corroborando a elevada precisão destes transdutores referida por Tatsuoka et al. (1999).

Na Figura 9 apresenta-se uma sequência de gráficos onde se pode ver as curvas típicas, obtidas com recurso a LDT's, de ciclos de carga-descarga de muito pequena amplitude (domínio elástico) para diferentes materiais, nomeadamente para um solo, um solo tratado com cal e dois

agregados. Refira-se que as curvas apresentadas na Figura 9 – a), b) e c) foram obtidas com o equipamento triaxial existente na UM e a Figura 9 – d) é obtida com o equipamento triaxial existente na ECP. Da análise da Figura 9 verifica-se que todos os ciclos são fechados e lineares pelo que se concluiu que com estes transdutores (LDT's) se consegue retirar os módulos de deformabilidade iniciais de diferentes materiais.

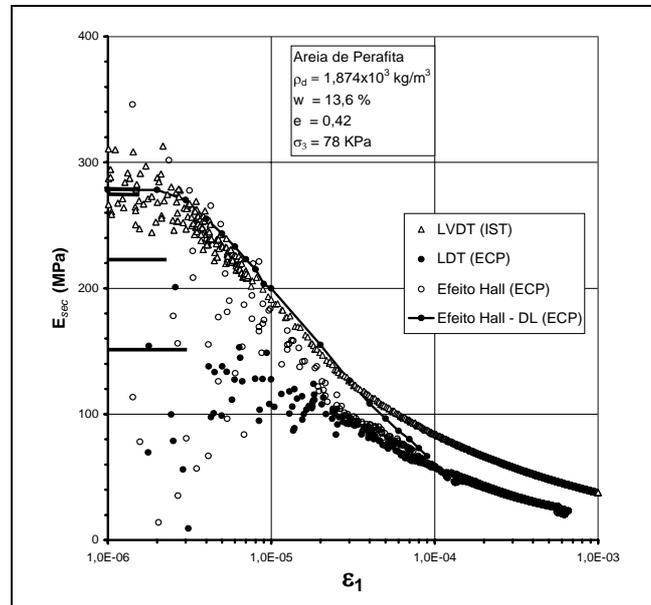


Figura 8 – Curvas de degradação obtidas com diferentes transdutores (depois de Hadiwardoyo, 2002).

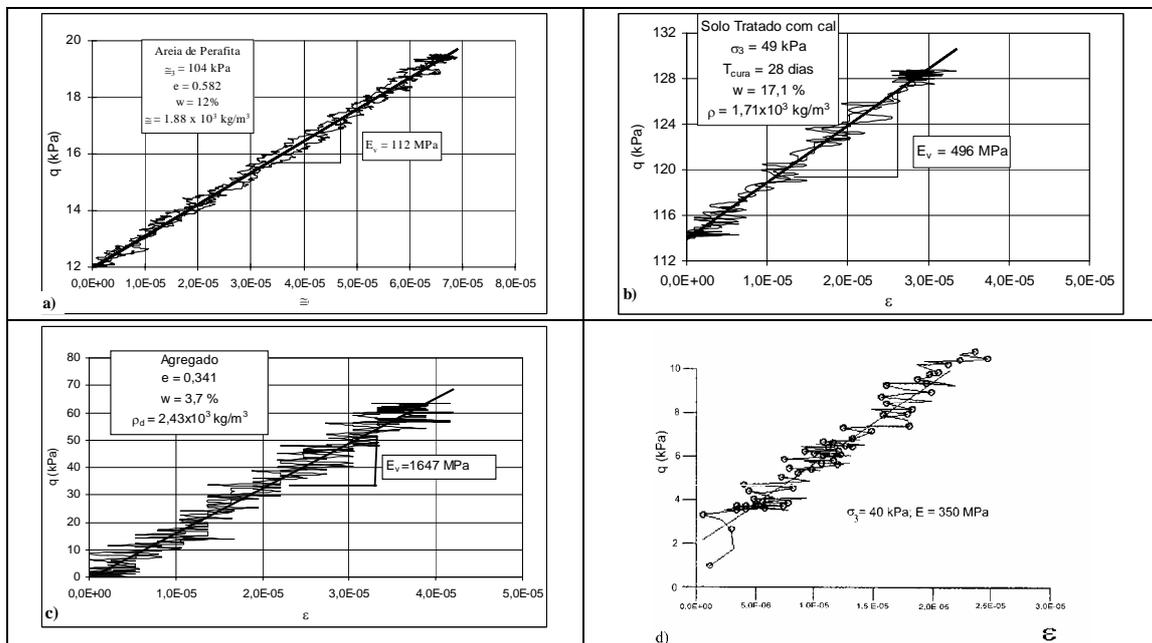


Figura 9 – Ciclos de carga-descarga de pequena amplitude para 4 materiais, obtidos com LDT's: a) – Solo (UM); b) – Solo tratado com cal (UM); c) – Agregado (UM); d) – Agregado (ECP).

A medição das deformações radiais sofridas pelas amostras é normalmente mais difícil e apresenta uma maior dispersão do que a medição das deformações axiais. Não obstante, a título de exemplo, apresenta-se na Figura 10 os resultados obtidos das deformações radiais obtidas com os LVDT's existentes no IST (lado direito da figura) e com os LDT's existentes na UM

(lado esquerdo da figura) para a um solo, revelando também aqui a adequabilidade dos sistemas de medida implementados.

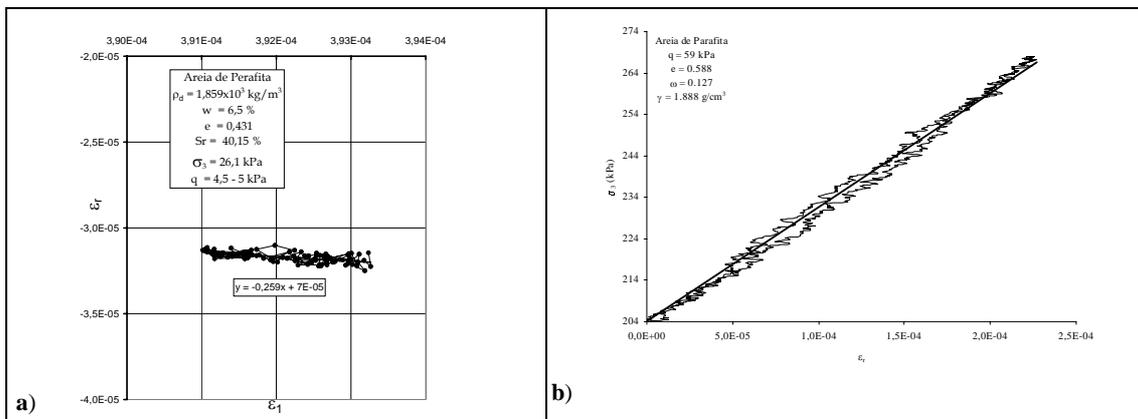


Figura 10 – Exemplo de registo da deformação radial: a) - LVDT's (IST); b) - LDT's (UM).

4. CONCLUSÕES

Devido à complexidade associada à medição interna das muito pequenas a pequenas deformações e pelas limitações apresentadas para cada um dos transdutores de deslocamento, verifica-se que há a necessidade de divulgar estas novas tecnologias. Assim, o sistema ideal para se medirem internamente as deformações será aquele que apresente as seguintes características: baixo custo; simplicidade de funcionamento; fácil fixação ao provete; não interferir com o comportamento do solo; ser preciso e capaz de medir deformações inferiores a 5×10^{-5} .

Dos resultados experimentais apresentados, é possível verificar que as técnicas de medida apresentadas têm sido objecto de melhoramentos significativos, permitindo a medição de deformações no domínio das muito pequenas a pequenas deformações que interessa à caracterização geotécnica na perspectiva de funcionalidade das estruturas. Isto, muito particularmente, para as linhas de alta velocidade onde as deformações admissíveis em serviço serão muito pequenas.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado no âmbito do projecto POCI/ECM/61114/2004 – “Interacção solo-via férrea para comboios de alta velocidade”, desejando os autores expressar um agradecimento à FCT pelo suporte financeiro concedido.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Bellotti R., Jamiolkowski M., Lo Presti D. C. F., O'Neill D. A. Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand, *Geotechnique*, Vol. 46 N°1 (1996) pp. 115-131.
- [2] Brown S. F., Austin G., Overay R. F. An instrumented triaxial cell for cyclic loading of clays, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 3 N°4 (1980).
- [3] Clayton C., Khatrush S. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens, *Geotechnique*, Vol. 36 N°4 (1986) pp. 593-597.
- [4] Clayton C., Khatrush S., Bica A., Siddique A. The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 12 N°1 (1989) pp. 69-76.

- [5] Coronado Garcia O. Etude du comportement mécanique de matériaux granulaires compactés non saturés sous chargements cycliques, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, (2005).
- [6] Cuccovillo T., Coop M. The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDT's, *Géotechnique*, Vol. 47 N.º1 (1997) pp. 167-171.
- [7] Dyvik R., Madshus C. Laboratory measurements of G_{max} using bender elements, *Advances in the engineering*, NGI publication, N.º161 (1985) pp. 117-137.
- [8] Dufour-Laridan E. Propriétés mécaniques des sols en petites déformations; étude expérimentale d'un sable silteux, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, (2001).
- [9] Ferreira C., Implementação e aplicação de transdutores piezoelétricos na determinação de velocidade de ondas sísmicas em provetes. Avaliação de qualidade de amostragem em solos residuais, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (2003).
- [10] Gomes Correia, A., Gillet S. A Large Triaxial Apparatus for Study of Granular Materials Under Repeated Loading Used at LNEC, *Flexible Pavements*, Gomes Correia eds. A. A. Balkema (1996) pp. 45- 64.
- [11] Gomes Correia A. Contribution a l'étude mécanique des sols soumis a des chargements cycliques, Thèse de Docteur-Ingénieur, École National des Ponts et Chaussées, (1985).
- [12] Gomes Correia A. Dynamic Characterization of Soils – load frequency effects and sample disturbance, XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Brazilian Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Association, Foz de Iguassu, Brasil, Vol. 2 (1999) separated paper.
- [13] Goto S., Tatsuoka F., Shibuya S., Kim Y-S., Sato T. A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soils and Foundations*, Vol. 31 N.º1 (1991) pp. 169-180.
- [14] Hadiwardoyo S. P., Characterization of granular materials from very small to large strains, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, (2002).
- [15] Hoque E., Sato T., Tatsuoka F. Performance evaluation of LDTs for use in triaxial tests, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 20 N.º.2 (1997) pp. 149-167.
- [16] Jardine R. Y., Simes M. Y., Burland J. B. The measurements of soil stiffness in triaxial apparatus, *Geotechnique*, Vol. 34 N.º.3 (1984) pp. 323-340.
- [17] Lo Presti C. F., Shibuya S., Rix G. J. Innovation in soil testing, Proc. II Int. Conf. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, IS Torino 99, Jamiolkowski, Lancellotta and Lo Presti Eds. Balkema, Rotterdam, Vol. 2 (2001) pp. 1027-1076.
- [18] Marques F. M. P. S. P. Uma contribuição para a modelação do comportamento reversível de misturas de agregados, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, (2003).
- [19] Paute Y.-L., Lefort R. Triaxial pneumatique à chargements répétés pour l'étude de graves non traitées et des sols supports de chausseés, Laboratoire Central des Ponts et Chausseés, rapports des Laboratoires, Série CR-8 (1987) 26 p.
- [20] Reis Ferreira S. Influência da não saturação e da granulometria nas características de deformabilidade de um Agregado Granítico, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, (2003).
- [21] Scholey G. K., Frost J. D., Lo Presti D. C. F, Jamiolkowski M. A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 8 N.º.2 (1995) pp. 137-156.
- [22] Tatsuoka F., Modoni G., Jiang G. L., Anh Dan L. Q., Flora A., Matsushita M., and Koseki J. Stress-strain behaviour at small strains of unbound granular materials and its laboratory tests, Keynote Lecture, Proc. of Workshop on Modelling and Advanced testing for Unbound Granular Materials, Gomes Correia Ed., Balkema, Lisboa, (1999) pp.17-61.
- [23] Viggiani G., Atkinson J. H. Interpretation of bender element tests, *Géotechnique*, Vol. 45 N.º.1 (1995) pp. 149-154.
- [24] Wichtmann T., Triantafyllidis Th. Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part II: cyclic axial preloading, http://www.gub.ruhr-uni-bochum.de/mitarbeiter/torsten/paper/journal/sdee_bender_elements_2004 (2004).