

# EQUIPAMENTO TRIAXIAL DE PRECISÃO PARA A DETERMINAÇÃO DO LIMITE ELÁSTICO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS

## PRECISION TRIAXIAL TEST FOR THE DETERMINATION OF THE ELASTIC DOMAIN OF SOILS

Araújo, N., *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, nuno@civil.uminho.pt*

Gomes Correia, A., *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*

### RESUMO

Provetes de um solo arenoso reconstituídos por compactação Proctor foram submetidos a trajetórias de tensão isotrópica e de tensão de desvio a partir de diferentes estados de tensão inicial no espaço p, q com recurso à utilização de um equipamento triaxial desenvolvido para o efeito. O equipamento utiliza uma câmara triaxial com instrumentação interna de modo a medir directamente no provete com precisão os estados de tensão e de deformação. Os resultados obtidos permitiram definir as tendências do limite do domínio de comportamento elástico do material, que serve de referência aos modelos de comportamento.

### ABSTRACT

Reconstituted samples by Proctor compaction of a sandy soil were investigated under different deviator and isotropic stress paths for different initial stress states in the p, q space, by means of a triaxial apparatus developed for this purposes. This equipment uses a triaxial cell with sample instrumentation for accurate measurements of stress and strain states. The tendencies of the limit of the elastic domain were established, which is a reference in the modelling framework.

### 1. INTRODUÇÃO

Apesar de amplamente utilizados, pouca atenção tem sido prestada ao comportamento mecânico dos geomateriais para baixos níveis de deformação, nos quais as propriedades físicas e mecânicas devem ser eficazmente controladas pelo Homem, quer para a construção de barragens, quer de aterros ou fundações. De acordo com Vinale et al. (1999), apesar de as deformações durante a fase construtiva serem elevadas, a caracterização para baixos níveis de deformação deve ser realizada para avaliar correctamente o estado de tensão durante o período de utilização. Após o período construtivo, as deformações do solo serão muito reduzidas, em parte devido à grande rigidez dos solos compactados, mas a sua correcta quantificação de extrema importância.

Jardine et al. (1991) dividiu o comportamento dos solos em 4 domínios. O primeiro, caracterizado pelo comportamento elástico e linear do solo até se atingir a superfície  $Y_1$ , (fig. 1a), é actualmente de possível definição. O valor da deformação para a superfície  $Y_1$  situa-se entre  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$ .

A correcta determinação do primeiro domínio de deformação requer especiais cuidados de modo a reduzir erros derivados da técnica laboratorial. Gomes Correia (1985, 2004a) e Burland (1989) verificaram que, para níveis de deformação inferiores a 0.1%, a tradicional instrumentação externa subestima a real rigidez dos solos sendo para esses níveis necessário o recurso à instrumentação local nos ensaios triaxiais (fig. 1b). Os erros da mediação externa

resultam, principalmente, do efeito de confinamento do provete, de fenómenos de flexão e deformação do sistema de ensaio (Jardine et al., 1984).

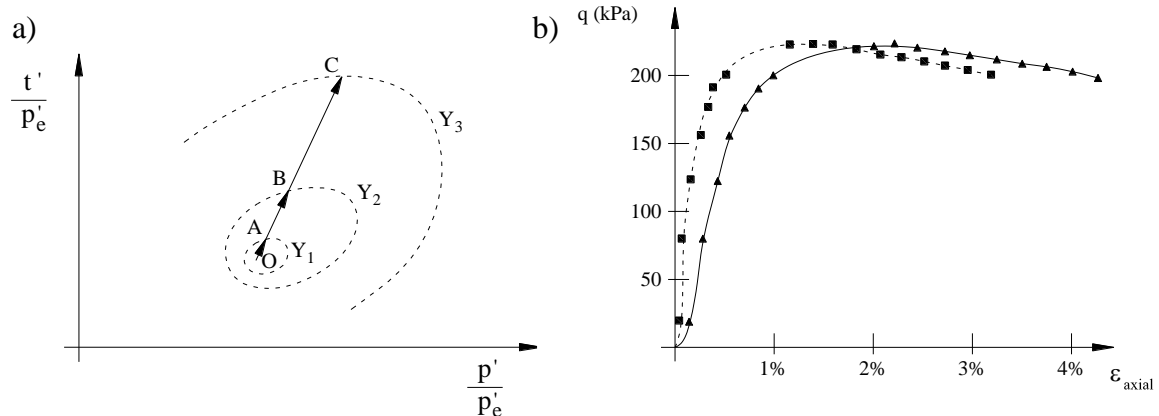


Figura 1 - (a) Superfícies limite de domínios (adaptado de Jardine, 1992) e (b) medições no ensaio triaxial convencional (contínuo) e no de precisão (tracejado) (adaptado de Gomes Correia, 1985)

A grande importância atribuída pela comunidade geotécnica ao domínio das pequenas deformações permitiu melhorar a previsão dos assentamentos do terreno sobre acção de cargas verticais de serviço; modificar os meios tradicionais de ensaio para ensaios mais sofisticados, quer de laboratório, quer “in situ”, bem como uma maior importância aos ensaios sísmicos; assim como uma evolução dos modelos simplificados do comportamento dos geomateriais para modelos mais realistas, incluindo factores relevantes do comportamento (Gomes Correia, 2004b).

## 2. INSTRUMENTAÇÃO LOCAL

Uma vez que o nível de deformação a analisar é reduzido, optou-se pela instrumentação local de um dos equipamentos triaxiais existentes na Universidade do Minho. O termo local implica que a deformação seja obtida sobre uma fracção do provete. Recorreu-se ao equipamento desenvolvido por Satoshi Goto no Laboratório de Engenharia Geotécnica do Instituto de Ciências Industriais da Universidade do Tóquio e designado por LDT (Local Deformation Transducer) por este ser capaz de atingir níveis de precisão da ordem dos  $10^{-6}$  (Goto et. al. 1991).

### 2.1. Instrumentação radial

De forma a ser possível o registo da deformação radial tornou-se necessário a criação de um sistema apto para funcionamento com LDT's em câmaras triaxiais de pequeno volume (fig. 2). Tal sistema pretende eliminar o recurso a um meio aquoso, para medição das variações de volume. A substituição da medição do volume do provete por um sistema baseado em LDT's constituiu, inicialmente, um problema. Contudo, a eliminação dos erros inerentes à deformabilidade da câmara, que conduzem a erros relevantes para a medição dos níveis de deformação para pequenas deformações, tornava esta tarefa de suma importância. A ausência de água no ensaio tornou também o ensaio de mais fácil utilização e menos exigente a nível de impermeabilização da instrumentação.

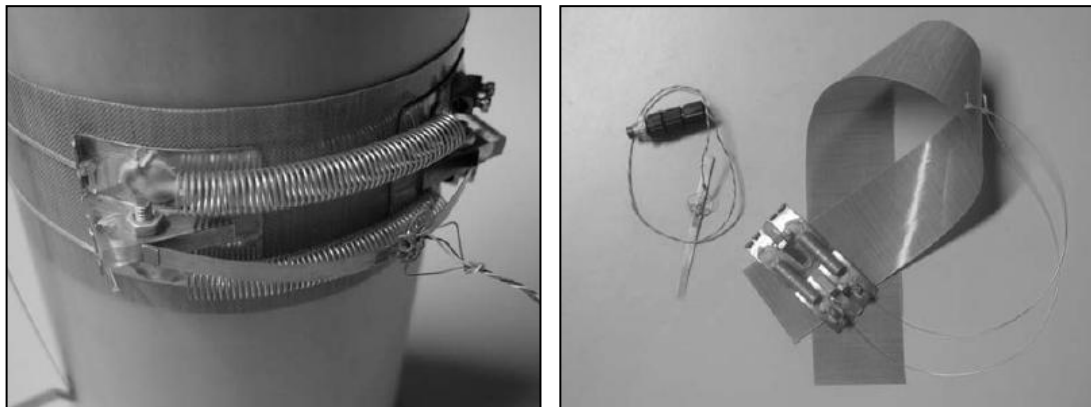


Figura 2 - Sistema de medição da deformação radial

## 2.2. Instrumentação axial

O registo da deformação axial foi realizado utilizando LDT's construídos na Universidade do Minho de acordo com o estabelecido por Goto et al. (1991). Unicamente se prestou atenção à escolha do comprimento do LDT seguindo as recomendações estabelecidas pelo autor. Salienta-se a não aplicação do sistema de impermeabilização em virtude de os ensaios a realizar recorrerem a meios pneumáticos para aplicação da tensão de confinamento.

## 3. AQUISIÇÃO E ACTUADORES

### 3.1. Sistema de aquisição

O sistema de aquisição utilizado é composto por uma placa de aquisição de dados com 8 entradas analógicas e 12 saídas digitais da National Instruments (Ref. NI USB-6009) (fig. 3b), 8 acondicionadores de sinal para pontes de Wheatstone (Ref. SG-3016 CR-G) (fig. 3b) e por uma fonte 24V/2A (Ref. DP-540A CR). Os sinais adquiridos foram amplificados para um intervalo de saída de  $\pm 10V$ , utilizando ganhos de 1000. Atendendo a que o conversor possui 14 bits a resolução obtida é de 1.221mV.

Relativamente à tensão de excitação, os LDT's foram alimentados com 3V apesar desta diferença de potencial originar uma corrente de 25mA, valor ligeiramente superior ao máximo recomendado pelos amplificadores (20mA). Optou-se por esta tensão para que o sinal gerado pelos LDT's abrangesse o mais possível o intervalo definido no amplificador ( $\pm 10mV$ ).

### 3.2. Actuadores

O sistema de carregamento foi obtido por recurso à câmara triaxial modelo 12406 da Wykeham Farrance disponível no Laboratório de Geotecnia da Universidade do Minho (fig. 3a) e pela introdução de servo-válvulas proporcionais. Atendendo à inexistência de um sistema capaz de aplicar os ciclos de carga-descarga de forma automatizada, dotou-se o sistema triaxial existente com um sistema de carregamento cíclico com controlo em tensão ou pressão. Tal sistema de carregamento, constituído por actuadores e válvulas pneumáticas permite quantificar, no domínio das pequenas deformações, o regime elástico. A opção por um sistema pneumático, apesar de limitado em termos de frequência de ensaio, foi utilizada por não requerer a aquisição de sistemas complementares.

Numa primeira fase optou-se pela utilização de servo válvulas proporcionais (modelo VPPE da FESTO). Contudo, verificou-se que o nível de resolução (aproximadamente 15kPa) se mostrava inadequada para os ensaios a realizar. Procedeu-se, então, a uma análise de modelos com maior precisão constatando-se que os modelos comerciais mais eficazes, capazes de aplicar pressões até 100kPa, apresentavam níveis de resolução de 0.2kPa. Tal pressão máxima de ensaio era claramente insuficiente e a escolha de versões para níveis mais elevados apresentavam pior resolução, pelo que foi necessário procurar uma alternativa não comercial.

Optou-se pela automatização de válvulas reguladoras de pressão mecânicas, amplamente utilizadas nos ensaios geotécnicos e sensíveis a 0.1kPa (mesmo a pressões de 500kPa). Salienta-se, contudo, que a utilização deste tipo de solução não permite a realização de variações rápidas na pressão. Tal limitação não constitui um impedimento no presente trabalho, pois os ensaios a realizar permitem uma aplicação lenta das solicitações. Para o controlo destes elementos mecânicos optou-se pela utilização de motores DC de passo (fig. 3c). Tais motores são construídos para aplicações nas quais se necessita de elevada precisão, nomeadamente em robótica.



Figura 3 - (a) Câmara triaxial com actuador pneumáticos incorporado, (b) componentes do sistema de aquisição e (c) motor DC de passo

Após implementação do sistema, verificou-se a sua eficiência na implementação de duas trajetórias distintas (fig. 4). Procedeu-se também à aplicação, para níveis de tensão mais elevados do que os apresentados, destas trajetórias tendo-se constatando uma ligeira perda na precisão obtida (proporcional ao nível de tensão aplicado) mas não limitativa da operacionalidade do sistema.

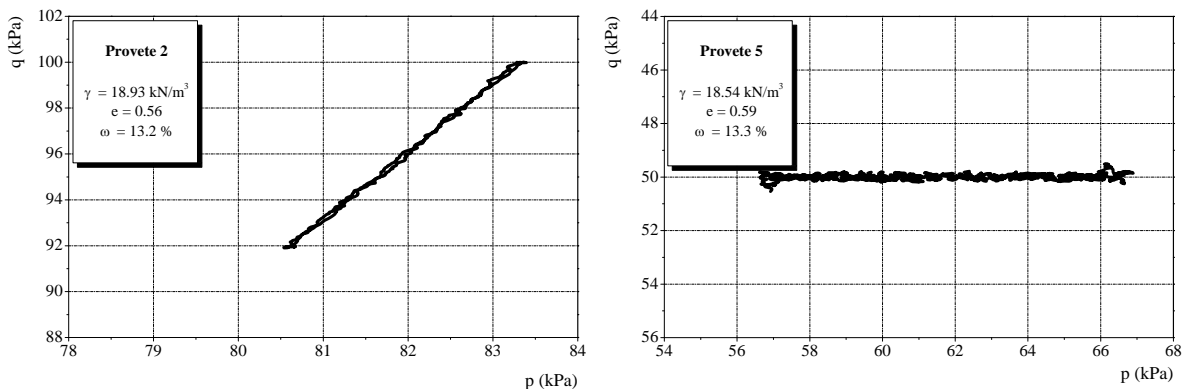


Figura 4 - Trajetórias de tensão automatizadas

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1. Solo estudado e preparação dos provetes

Pretendeu-se avaliar o comportamento no domínio das pequenas deformações de uma areia, designada por Areia de Perafita. Trata-se de uma areia siltosa, já alvo de numerosos estudos no âmbito de um projecto de cooperação bilateral, França - Portugal, envolvendo numa primeira fase o Instituto Superior Técnico e numa segunda fase a Universidade do Minho com a Ecole Centrale Paris-MSSMat. (Hadiwardoyo (2002), Fleureau et al. (2002) e Reis Ferreira (2003)).

A densidade das partículas sólidas determinada foi de 2.69. A análise granulométrica foi realizada após remoção da fracção superior ao peneiro #4 (para eliminação da fracção cascalho existente). A Figura 5 apresenta os resultados da análise granulométrica do solo estudado (linha contínua), constatando-se que contém uma maior percentagem de finos que o solo objecto dos estudos anteriores (linha tracejada) (Hadiwardoyo (2002), Fleureau et al. (2002) e Reis Ferreira (2003)).

A construção dos provetes foi realizada por recurso a um molde cilíndrico com 100mm de diâmetro e 200mm de altura. De forma a garantir uma massa volúmica constante em toda a extensão do provete, procedeu-se à construção do provete utilizando 5 camadas, cada uma com 4cm de espessura. Cada camada foi compactada por recurso a uma prensa mecânica. No presente estudo os provetes foram fabricados para as seguintes condições de estado: peso volúmico natural de  $18.9\text{kN/m}^3$ , índice de vazios de 0.56, grau de saturação de 62% e teor em água de 13%.

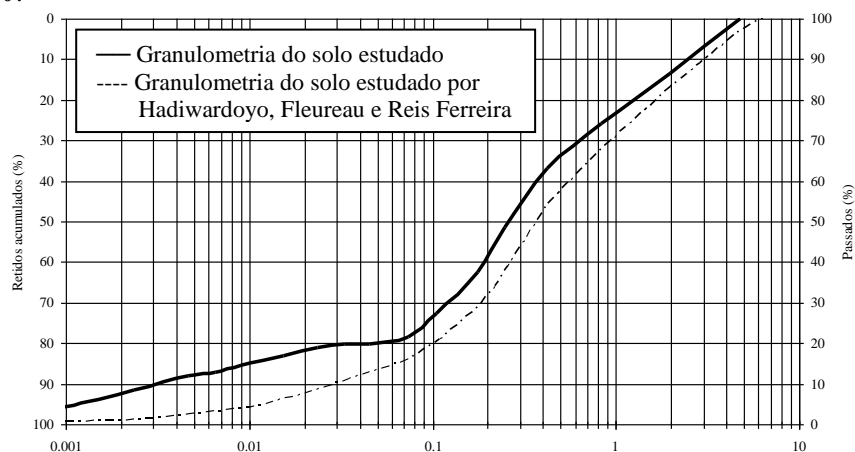


Figura 5 - Análises granulométricas da areia de Perafita

### 4.2. Programa de ensaios

O programa experimental envolveu a realização de ensaios prévios, utilizando um equipamento triaxial cíclico não automatizado. O equipamento de ensaio disponível, constituído por uma câmara triaxial com instrumentação local, permitiu aplicar, por meio de um regulador de pressão mecânica, uma pressão constante na câmara triaxial. É de salientar que este sistema de aplicação das tensões, por não estar automatizado, não permitiu corrigir pequenas variações inerentes ao regulador de pressão. Apesar de as variações detectadas serem reduzidas, os valores obtidos foram alvo de comparação com os resultados obtidos com o equipamento automatizado.

Com o sistema automatizado foi possível aplicar, em cada uma das trajectórias de tensão aplicadas, pressões de confinamento ou tensões de desvio constantes, variando-se a outra em

incrementos de 2kPa até se registar histerésis no ciclo carga-descarga. Cada incremento foi aplicado repetidamente 10 vezes. As Figuras 6 e 7 ilustram resultados relativos ao limite do regime elástico linear em trajectórias de variação da pressão de confinamento e da tensão de desvio, com controlo automático das amplitudes. O domínio elástico do material corresponde ao comportamento em que, num ciclo de carga-descarga ou de descarga-recargada variação da tensão de desvio ou da tensão de confinamento, a partir de um mesmo estado inicial, a relação tensão extensão é linear e não exhibe histerésis.

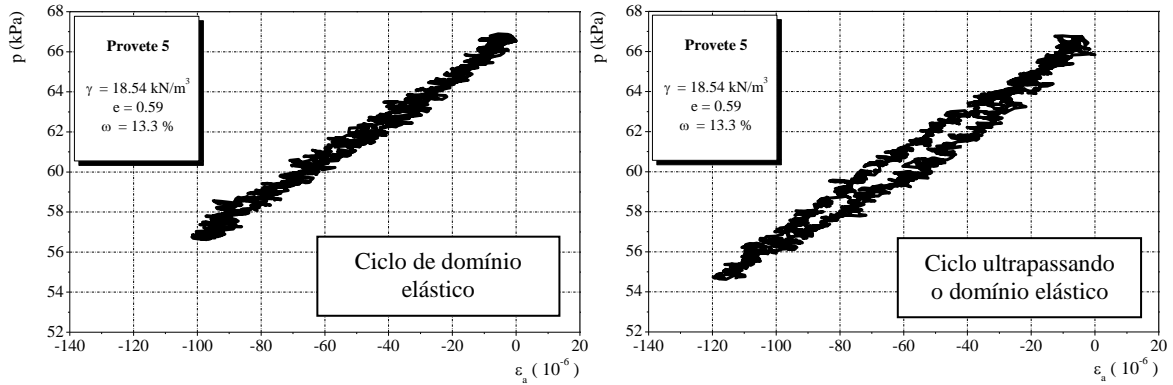


Figura 6 - Determinação do domínio elástico por variação da pressão de confinamento

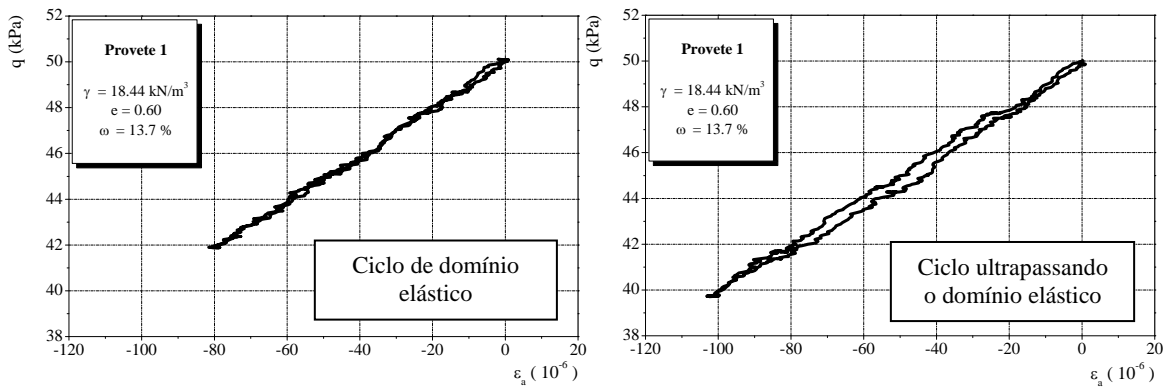


Figura 7 - Determinação do domínio elástico por variação da tensão de desvio

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base nas amplitudes dos ciclos dentro do limite do domínio elástico procedeu-se à análise das tendências observadas experimentalmente. Neste sentido foram considerados, nesta fase inicial do estudo, como parâmetros intervenientes na definição do domínio elástico o estado de tensão inicial e a trajectória de tensão aplicada.

Constatou-se, para todos os estados de tensão inicial ( $p_0$ ,  $q_0$ ), que as trajectórias de incremento (carga-descarga) exibem maiores amplitudes que nas trajectórias de redução (descarga-recarga), ambas partindo do mesmo estado de tensão inicial. Verificou-se também a tendência dos incrementos de tensão isotrópica conduzirem a amplitudes substancialmente superiores às das trajectórias com incrementos da tensão de desvio. Analisando ainda a influência, em função do estado de tensão inicial, da variação da tensão de desvio inicial ( $q_0$ ) ou da tensão normal média inicial ( $p_0$ ), constatou-se uma muito maior influência do estado de tensão normal média inicial.

A Figura 8 pretende resumir as tendências detectadas, para as condições de estado do material estudado, em função da alteração do estado de tensão inicial. Neste sentido encontra-se representado a tracejado a evolução do domínio elástico admitindo o aumento da tensão de desvio inicial (as 3 regiões com tracejado à esquerda) ou o aumento da tensão média inicial (as 2 regiões com tracejado à direita). Salienta-se que as regiões com fronteiras a negrito foram obtidas por extrapolação. O espaço de tensões objecto do presente estudo foi:  $p_0$  de 50kPa a 150kPa e  $q_0$  de 12kPa a 150kPa.

As fronteiras representativas de aumentos da tensão de desvio inicial (a pressão hidrostática inicial foi mantida constante) representam a amplitude dos últimos ciclos no domínio elástico das trajectórias de variação da tensão média (a tensão de desvio foi mantida constante). No caso das fronteiras representativas de aumentos da tensão média (a tensão de desvio inicial foi mantida constante) representam a amplitude dos últimos ciclos no domínio elástico das trajectórias de variação da tensão de desvio (a pressão hidrostática foi mantida constante).

No estado tensional inicial genérico  $n$  (fig. 8) encontram-se representadas as trajectórias de tensões implementadas em diversos estados tensionais iniciais para obtenção das fronteiras de domínio elástico.

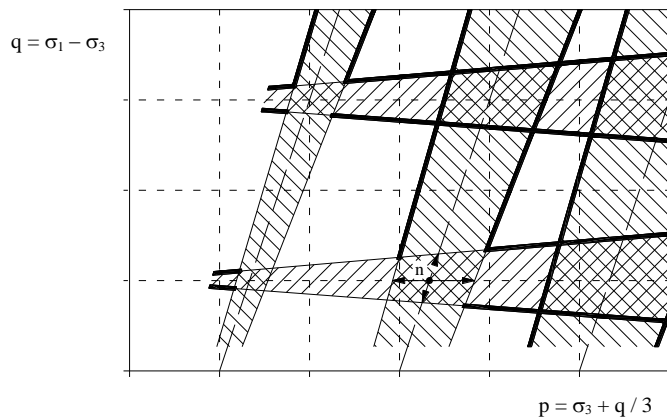


Figura 8 - Esquema dos incrementos de tensão correspondentes ao limite do domínio elástico

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que o limite do comportamento elástico depende, quer do estado de tensão inicial, quer da trajectória da variação do estado de tensão. A influência da tensão normal média inicial parece ser mais importante que o estado de anisotropia inicial. Além disso, um incremento da tensão isotrópica parece conduzir a um maior limite do domínio elástico que qualquer uma das outras trajectórias de tensão, objecto do presente estudo.

Contudo, a realização de trajectórias de tensão noutras direcções é ainda necessária de forma a proporcionar uma completa definição da superfície do domínio elástico. Este resultado julga-se ser de interesse prático relevante, sobretudo na perspectiva da escrita de uma lei constitutiva para o material estudado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores exprimem os seus agradecimentos à Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro no âmbito do projecto POCI/ECM/6114/2004 – “Interacção solo-via férrea

para comboios de alta velocidade”, bem como ao Professor Doutor Jaime Fonseca e ao Eng. Carlos Palha pela contribuição no presente estudo.

## REFERÊNCIAS

- Burland, J.B. (1989). “*Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains*”. *Canadian Geotechnical Journal*, No. 26, 499-516.
- Fleureau, J.M., Hadiwardoyo, S., Dufour-Laridan, E., Langlois, V. e Gomes Correia, A. (2002). “Influence of suction on the dynamic properties of a silty sand”. *8º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 4, 2591-2601.
- Gomes Correia, A. (1985). “*Contribution a l’étude mécanique des sols soumis a des chargements cycliques*”. *Tese de Doutoramento*, Ecole National des Ponts et Chaussées, École National des Ponts et Chaussées, Paris.
- Gomes Correia, A. (2004a). “Evaluation of mechanical properties of unbound granular materials for pavements and railtracks”. *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction*, Athens, Greece, 2004.
- Gomes Correia, A. (2004b). “*Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas*”. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, No. 100, 103-122.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y-S e Sato, T (1991). “*A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory.*” *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 1, 169-180.
- Hadiwardoyo, S.P (2002). “*Characterization of granular materials from very small to large strain.*” *Tese de Doutoramento*, Ecole Centrale de Paris, Paris.
- Jardine, R.J., Symes, M.J e Burland (1984). “*The measurements of soil stiffness in the triaxial apparatus.*” *Géotechnique*, Vol. 34, No. 3, 323-340.
- Jardine, R.J., John, H.D., Hight, D.W. e Potts, D.M. (1991). “Some practical applications of a non-linear ground model.” *Proceedings of 10<sup>th</sup> ECSMFE*, Florence, A.A. Balkema, 223-228.
- Jardine, R.J. (1992). “Some observations on the kinematic nature of soil stiffness.” *Soils and Foundations*, Vol. 32, No 2, 111-124.
- Reis Ferreira, S.M. (2003). “*Influência da não saturação e da granulometria nas características de deformabilidade de um agregado granítico*”. *Tese de Mestrado*, Instituto Superior Técnico.
- Vinale, F., Onofrio, A., Mancuso, C., Magistris, F.S. e Tatsuoka, F. (1999). “The pre-failure behaviour of soils as construction material.” *II International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Torino, 955-1007.