

CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE E INFLUÊNCIA DA NÃO SATURAÇÃO EM MATERIAIS GRANÍTICOS

STIFNESS AND INFLUENCE OF NON-SATURATION IN GRANITIC MATERIALS

Ferreira, Sandra, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal,*
sandraferreira@civil.uminho.pt

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

Fleureau, Jean-Marie, *Ecole Centrale Paris & CNRS, Châtenay-Malabry, France,*
jean-marie.fleureau@ecp.fr

RESUMO

Neste artigo, apresentam-se as características de deformabilidade para dois materiais com a mesma origem geológica: um agregado granítico (0/12.5; $D_{50}=0.52\text{mm}$) e uma areia siltosa designada de areia de Perafita (0/6.35; $D_{50}=0.36\text{mm}$). A rigidez, dos materiais compactados, no domínio das pequenas deformações ($\varepsilon < 10^{-5}$) é estudada através de ensaios triaxiais de precisão. A influência da não saturação na deformabilidade dos materiais é estudada através de ensaios triaxiais com medição das pressões intersticiais. Tais medidas permitiram a análise do comportamento mecânico dos materiais não saturados em termos de tensões efectivas, que foram calculadas através das aproximações de Terzaghi e Bishop. Os resultados obtidos mostram para cada material uma relação única entre o módulo de deformabilidade e a tensão efectiva (para $e=0.5$), independentemente do grau de saturação das amostras ensaiadas.

ABSTRACT

In this paper, the stiffness of two materials with the same geological origin is presented, a granite aggregate (0/12.5, $D_{50}=0.52\text{mm}$) and a silty sand, called Perafita sand (0/6.35; $D_{50}=0.36\text{mm}$). The stiffness in very small strains ($\varepsilon < 10^{-5}$) of the compacted materials is studied by means of precision triaxial tests. The influence of non-saturation on the stiffness is also studied through triaxial tests with measurement of negative pore water pressures. Such measurements allow the analysis of the mechanical behaviour of the unsaturated material in terms of effective stresses. For this purpose two approaches were used: the Terzaghi's and Bishop's approaches. The results obtained show, for each material, a unique relationship between vertical stiffness and vertical effective stress (constant void ratio=0.5), independently of the saturation degree of the studied samples.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do módulo de deformabilidade ou de distorção (E_0 ou G_0) inicial é muito importante, pois constitui um valor de referência na maioria dos modelos de análise numérica. A investigação efectuada nesta matéria é de grande interesse, uma vez que no domínio das pequenas deformações as propriedades dos solos não são afectadas, de forma sensível, pelo carácter cíclico, dinâmico ou estático das acções. Sendo assim, a determinação dos módulos iniciais dos solos pode ser efectuada através, de ensaios dinâmicos (coluna ressonante), de ensaios cíclicos ou estáticos (ensaios triaxiais de precisão).

Refira-se, que o comportamento dos solos que interessa estudar para as obras de engenharia civil, depende do nível de deformação máximo, a qual difere de obra para obra. De acordo com Biarez et al. (1999), a deformação nos solos e materiais granulares de pavimentos rodoviários é da ordem dos 10^{-4} , para túneis da ordem de 10^{-3} , para fundações 10^{-2} e para aterros em solos moles 10^{-1} . Generalizando, pode-se concluir que a maioria das estruturas apresentam valores de deformação da ordem dos 5×10^{-3} sendo, portanto, o domínio das pequenas deformações muito importante para o dimensionamento em serviço das estruturas. Convém referir que o domínio elástico linear se situa, geralmente, a níveis de deformações inferiores a 10^{-5} . A partir deste valor e até cerca de 10^{-4} , o comportamento dos solos é não linear, mas reversível, o que significa que se está perante deformações permanentes desprezáveis, apesar de num ciclo de carga-descarga a curva tensão-deformação apresentar histereses (Jardine et al. 1984).

Os principais factores que afectam o módulo de deformabilidade inicial dos materiais granulares são o nível de tensão e o índice de vazios. A influência do nível de tensão traduz-se através de uma lei de potência. De acordo com vários autores (Jiang et al. 1997, Hoque e Tatsuoka 1998 e Gomes Correia et al. 2001) a lei de potência que descreve o módulo de deformabilidade vertical, E_v , no domínio das muito pequenas deformações, não inclui a tensão horizontal, σ_h , como variável e é dada pela equação (1), onde C é uma constante ligada ao material, σ_v é a tensão vertical, p_a é a tensão de normalização e vale 100 kPa e n é a potência. No que se refere à função de índice de vazios, $f(e)$, normalmente, utiliza-se a função proposta por Hardin e Richart (1963), dada pela equação (2), onde e é o índice de vazios.

$$E_v = C \left(\frac{\sigma_v}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

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

Um outro aspecto muito importante é a avaliação do comportamento dos solos em termos de tensões efectivas, uma vez que em termos destas as respostas são únicas, passando os parâmetros mais importantes que regem o comportamento, a ser características intrínsecas. Assim, quando os solos estão saturados ou quando apresentarem um grau de saturação elevado, isto é, superior a 70% (Fleureau et al. 2003) utiliza-se para o cálculo da tensão efectiva o conceito proposto por Terzaghi (equação 3). Quando os solos tiverem graus de saturação baixos deverá utilizar-se outro modelo, tal como o de Bishop. Neste modelo muito simples, a tensão efectiva é dada pela equação (4), onde χ é um factor que depende do grau de saturação e u_a e u_w são as pressões do ar e da água, respectivamente.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (3)$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

Neste artigo estuda-se, por um lado as características de deformabilidade, no domínio das pequenas deformações, de um agregado granítico (0/12.5), através de ensaios triaxiais de precisão. Por outro, estuda-se a influência da não saturação nas características de deformabilidade através de ensaios triaxiais com medição das pressões intersticiais negativas. Finalmente comparam-se os resultados obtidos no agregado granítico (0/12.5, $D_{50}=0.52\text{mm}$) com os obtidos numa areia siltosa, designada de areia de Perafita (0/6.35, $D_{50}=0.36\text{mm}$). Refira-se que os materiais têm a mesma origem geológica.

2. MATERIAL, EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

2.1. Material

No Quadro 1 apresentam-se as características geométricas das curvas granulométricas para os dois materiais (agregado granítico e areia de Perafita). Na Figura 1 apresentam-se as curvas Proctor modificado dos materiais, bem como as condições de compactação das amostras ensaiadas para o agregado granítico. No estudo do agregado granítico foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios triaxiais com medição das pressões intersticiais negativas (TTU) para estimar as tensões efectivas, e ensaios triaxiais de precisão (PTT) para avaliar a rigidez dos materiais no domínio das pequenas deformações. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Materiais, Estruturas e Solos da Ecole Centrale Paris (ECP) em França.

Quadro 1- Características geométricas das curvas granulométricas dos materiais

Material	D_{max} (mm)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	Cc
Agregado Granítico (0/12.5)	12.50	0.040	0.230	0.52	0.78	20	1.7
Areia de Perafita (0/6.35)	6.35	0.033	0.185	0.36	0.56	17	1.9

D_{max} = Dimensão máxima das partículas; D_x = Dimensão das partículas correspondente a x (%) do material passado; Cu = Coeficiente de uniformidade; Cc = Coeficiente de curvatura

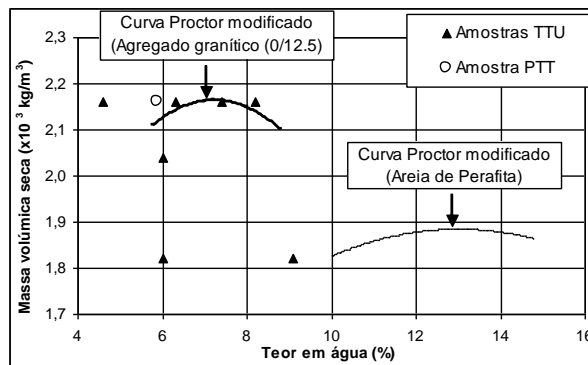


Figura 1 – Curvas do ensaio Proctor modificado e amostras ensaiadas

2.2. Ensaios triaxiais com medição das pressões negativas (TTu)

A medição das pressões intersticiais negativas foi realizada com um equipamento triaxial convencional, no qual se incorporou na base da câmara uma placa porosa semi-permeável (ver Figura 2-a). A placa porosa tem a capacidade de prevenir a passagem de ar no circuito da água. Nestes ensaios é necessário garantir um perfeito contacto da amostra com a placa porosa e isto é conseguido colocando uma camada muito fina de uma lama caulinítica (Figura 2-b).

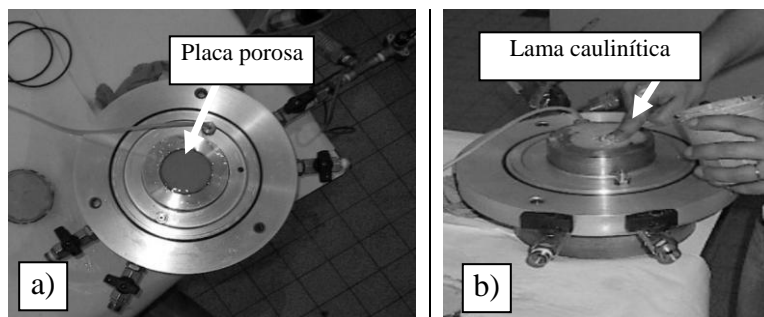


Figura 2 - a) Placa porosa semi-permeável; b) colocação da lama caulinítica

As medições das pressões intersticiais foram realizadas em dois patamares: (i) consolidação isotrópica para diferentes tensões de confinamento (0, 26, 52 e 78 kPa). A variação da pressão intersticial negativa foi medida até que o equilíbrio fosse estabelecido e por ultimo (ii) compressão axial, a uma velocidade de carregamento constante até ser atingida a rotura.

2.3. Ensaio triaxial de precisão (PTT)

Para o estudo das características de deformabilidade no domínio das pequenas deformações, ensaiou-se uma única amostra, com 150mm de diâmetro e 300mm de altura e utilizou-se o equipamento triaxial de precisão existente na ECP. Na Figura 3-a) apresenta-se uma fotografia dos transdutores de deslocamento axial utilizados nas medidas das deformações axiais locais (LDT - Local Deformation Transducer; Goto et al. 1991). Hoje em dia este equipamento também está operacional na Universidade do Minho (Gomes Correia et al. 2006 - Figura 3-b).

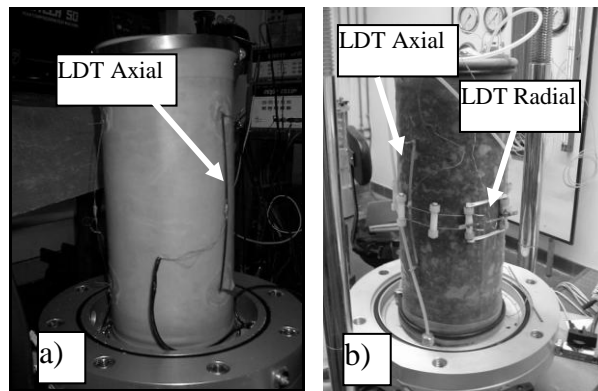


Figura 3 - a) Transdutores de deslocamento axial utilizados; b) Transdutores existente na Universidade do Minho

O procedimento de ensaio consistiu em submeter a amostra a diferentes tensões de confinamento (13, 52, 65 e 78kPa). Para cada tensão de confinamento foram aplicados cinco ciclos de carga/descarga de muito pequena amplitude. Essa amplitude foi controlada para se garantir que os ciclos são fechados e lineares, de forma a se avaliar o módulo de deformabilidade no domínio das pequenas deformações. Para a última tensão de confinamento (78kPa), a amostra foi submetida a um ciclo de carga/descarga de grande amplitude. Durante o processo de descarga realizaram-se ciclos de carga/descarga de tensão vertical de muito pequena amplitude, a diferentes níveis. Na Figura 4-a apresenta-se o procedimento de ensaio para a última tensão de confinamento e na Figura 4-b apresenta um desses ciclos de carga/descarga de muito pequena amplitude.

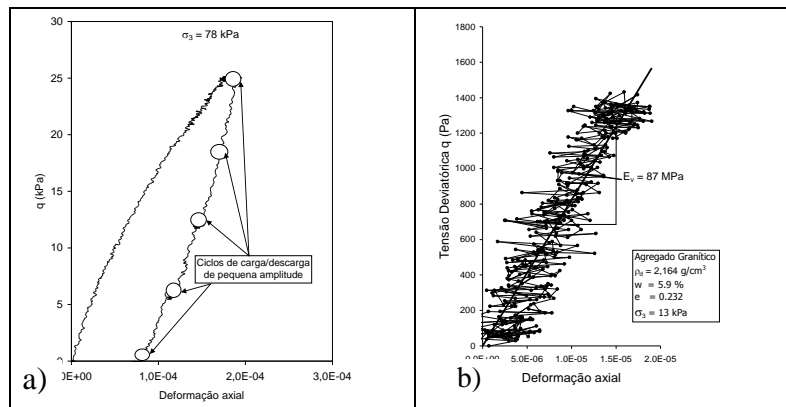


Figura 4 - a) Procedimento de ensaio para a tensão de confinamento de 78kPa; b) Exemplo de um ciclo de carga/descarga de muito pequena amplitude

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

3.1. TTu

Na Figura 5 apresenta-se, a evolução da pressão intersticial com o nível de deformação aplicado às amostras.

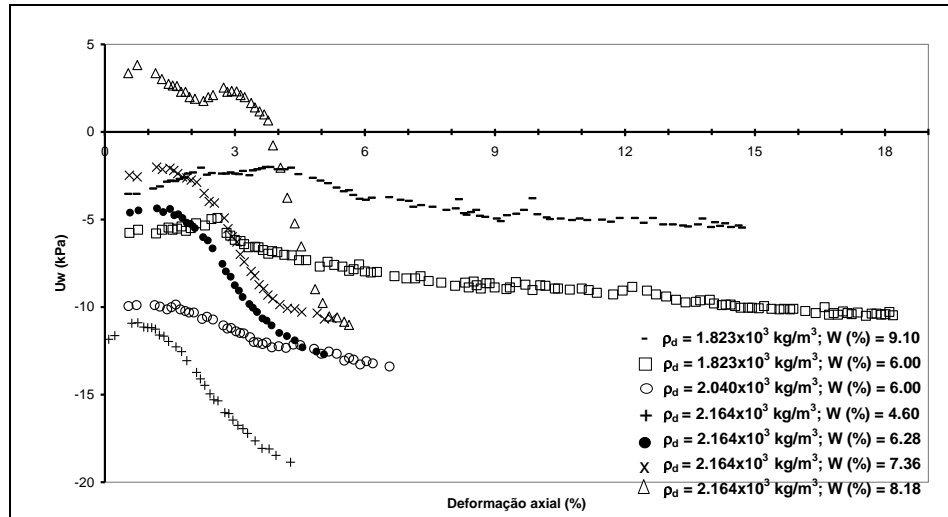


Figura 5 – Evolução das pressões intersticiais com o nível de deformação

O objectivo da medição das pressões intersticiais negativas foi sobretudo o de estimar as tensões efectivas. Para essa estimativa foram utilizados dois conceitos: Terzaghi ($p' = p - u_w$) e Bishop ($p' = p - \chi \cdot u_w$). Na Figura 6 apresenta-se a linha de tendência encontrada, da tensão de desvio máxima em função da tensão média efectiva, para todas as amostras compactadas (com vários teores em água e densidades, ver Figura 1). Quando se analisa cada aproximação individualmente encontram-se os valores de 2.29 e 2.31, para as aproximações de Terzaghi e Bishop, respectivamente. Estes valores são muito similares porque o agregado granítico tem pressões intersticiais negativas baixas (ver Figura 5) e as amostras têm baixa compressibilidade sob as condições de ensaio.

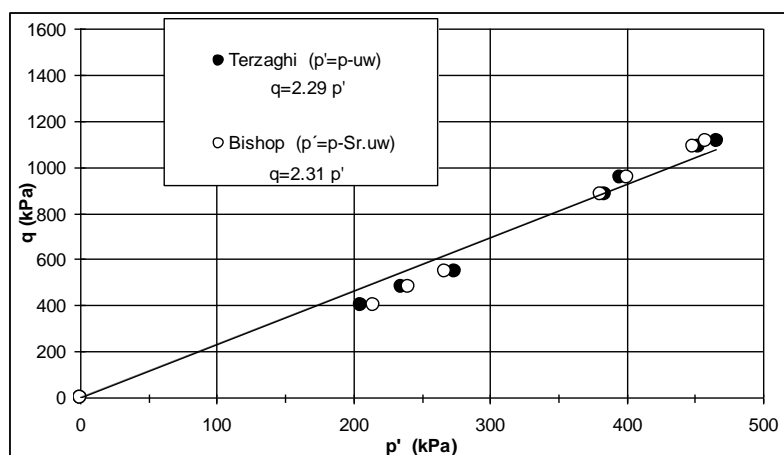


Figura 6 – Envoltura de pico para os ensaios triaxiais de compressão

Baseando-nos nestes resultados, e em outros apresentados por diversos investigadores (Biarez et al. 1994, Fleureau et al. 2003 e Ferreira e Gomes Correia 2006), verifica-se que o conceito de tensão efectiva permite uma forma simples de modelar o critério de rotura do solo.

3.2. PTT

O módulo de deformabilidade no domínio das pequenas deformações foi obtido, por um lado, para estados de tensão isotrópicos e por outro, para estados anisotrópicos de tensão (Figura 4-a). O módulo de deformabilidade vertical (E_v) é calculado como apresentado na Figura 4-b e os valores foram normalizados para uma tensão pa de valor igual a 100kPa (ver equação 1). A análise dos resultados é feita quer em tensões totais quer em tensões efectivas.

Para a interpretação dos resultados em termos de tensão efectiva, as pressões intersticiais negativas foram derivadas das medições realizadas nos ensaios triaxiais com medição das pressões intersticiais, sobre uma amostra com teor em água e índice de vazios semelhante à ensaiada no ensaio triaxial de precisão e sob o mesmo nível de tensão (Ferreira 2003). Mais uma vez, as tensões efectivas foram estimadas utilizando as duas aproximações.

Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos em termos de tensão total e efectiva e como se pode verificar a evolução do módulo de deformabilidade em função da tensão vertical (total ou efectiva) segue uma lei de potência dada pela equação (1). Desta figura verifica-se ainda que o comportamento do agregado granítico em termos de tensões efectivas é similar para ambas as aproximações (Terzaghi e Bishop). Isto acontece porque os valores das pressões intersticiais negativas são pequenas, o material tem uma baixa compressibilidade e o grau de saturação da amostra ensaiada é bastante elevado (69%).

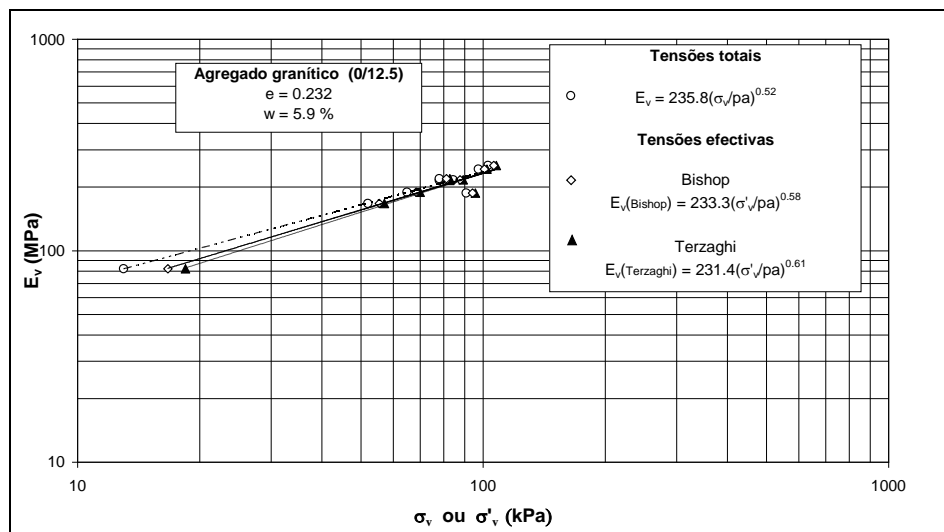


Figura 7 – Módulo de deformabilidade em função da tensão vertical, total e efectiva

4. COMPARAÇÕES ENTRE O AGREGADO E A AREIA DE PERAFITA

Para se proceder à comparação dos resultados dos dois materiais (agregado granítico e areia de Perafita), os valores encontrados para o módulo de deformabilidade foram corrigidos para eliminar o efeito do índice de vazios inicial e normalizados para um índice de vazios de valor igual a 0.5. O valor normalizado foi calculado através da equação (5), onde $f(e)$ é a função de índice de vazios apresentada na equação (2) e E^* é o valor medido nas amostras.

$$E = E^* \frac{f(0,5)}{f(e)} \quad (5)$$

Os resultados apresentados para a areia de Perafita foram obtidos por Fleureau et al. (2003). Refira-se que esses resultados foram obtidos para diferentes amostras, sob diferentes condições

de compactação (teores em água variam dos 6.5% aos 18.3%), com diferentes dimensões e utilizando diferentes equipamentos experimentais.

Os resultados apresentados na Figura 8 mostram que a areia de Perafita apresenta valores de módulo de deformabilidade superiores ao do agregado granítico (0/12.5), para a mesma tensão efectiva. Estes resultados evidenciam que o módulo de deformabilidade aumenta com a diminuição da dimensão máxima das partículas. Refira-se contudo que, a utilização da equação 2 para ter em conta as variações do índice de vazios deve ser tomada com precaução (Kokusho e Yoshida 1997, referido por Gomes Correia et al. 2001). Estes autores ao medirem a velocidade de corte (V_s) de cascalhos densos com diferentes densidades, variando de estados muito soltos a muito densos, verificaram que a relação entre os valores de V_s e o índice de vazios, com diferentes coeficientes de uniformidade, não é única sob as mesmas condições, mas é fortemente afectada pelas características de gradação.

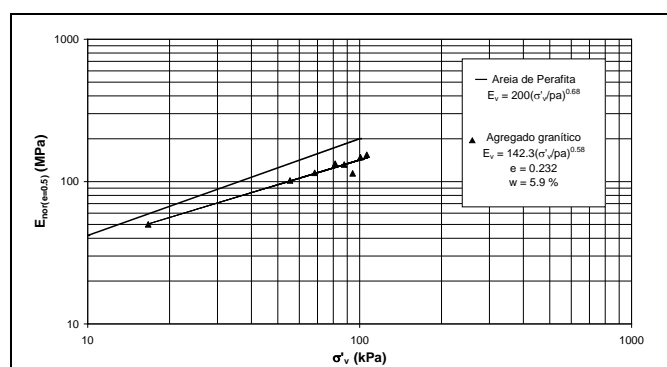


Figura 8 – Comparação do módulo de deformabilidade, normalizado para um índice de vazios de 0.50, para materiais com a mesma origem geológica

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliaram-se as características de deformabilidade de dois materiais com a mesma origem geológica: agregado granítico (0/12.5, $D_{50}=0.52\text{mm}$) e uma areia siltosa, designada de areia de Perafita (0/6.35; $D_{50}=0.36\text{mm}$). O módulo de deformabilidade, no domínio das pequenas deformações ($\epsilon < 10^{-5}$) foi determinado através dos ensaios triaxiais de precisão, utilizando medidas locais de deformação (LDT's - Local Deformation Transducer (Goto et al. 1991)).

A influência de não-saturação na deformabilidade foi estudada através de ensaios triaxiais com medidas de pressão intersticial negativas. Tais medidas permitiram a análise do comportamento mecânico dos materiais não saturados em termos de tensões efectivas. Para este propósito foram utilizadas duas aproximações: Terzaghi e Bishop. Para o agregado granítico (0/12.5) os valores encontrados para a tensão efectiva, utilizando as duas aproximações, foi similar. Isto deveu-se aos pequenos valores de pressões intersticiais negativas e à baixa compressibilidade do material sob as condições de ensaio.

Os resultados obtidos para o agregado granítico (0/12.5) mostram uma única relação entre o módulo de deformabilidade vertical elástico e a tensão efectiva. Fleureau et al. (2003) também encontraram para a areia de Perafita uma relação única entre o módulo de deformabilidade vertical e a tensão efectiva vertical (índice de vazios constante=0.5), independentemente do grau de saturação das amostras estudadas. Estes resultados mostram por um lado, a relevância da utilização da análise em termos de tensões efectivas no comportamento dos geomateriais no domínio das pequenas deformações e por outro, a importância da medição da pressão intersticial negativa.

Os valores do módulo de deformabilidade obtidos para areia de Perafita foram superiores aos do agregado granítico, para o mesmo índice de vazios e nível de tensão. Contudo, este resultado deve ser considerado com algumas reservas, até que se clarifique a questão de qual é a função de índice de vazios que melhor descreve o comportamento dos materiais com valores muito baixos de índice de vazios e valores elevados de Cu.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto GRICES/CNRS – “Security of road and railway infrastructures versus climatic changes”. Os autores querem agradecer ao GRICES/CNRS pelo suporte financeiro o que permitiu realização desta cooperação bilateral.

REFERÊNCIAS

- Biarez, A., Fleureau, J. M. e Taibi S. (1994). “Critère de résistance maximale des sols non saturés: approche expérimentale et modélisation.” *Proc. XIII Int. Conf. on Soil Mechanical and Foundation Engineering*, Oxford and I. B. H. Pub. Co., New-Delhi. 385-388.
- Biarez, J., Liu, H., Gomes Correia, A. e Taibi, S. (1999). “Stress-strain characteristics of soils interesting the serviceability of geomaterials structures.” *Proc. II Int. Conf. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, IS Torino 99, Jamiolkowski, Lancellotta and Lo Presti Eds. Balkema, Rotterdam. (1) 617-624.
- Ferreira, S. M. R. (2003). “Influência da não saturação e da granulometria nas características de deformabilidade de um Agregado Granítico.” *Tese de Mestrado*, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- Ferreira, S. M. R. e Gomes Correia, A. (2006). “Influência da granulometria nas características de deformabilidade de materiais de natureza granítica.” *10º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, (2), 591-598.
- Fleureau, J. M., Hadiwardoyo, S. e Gomes Correia, A. (2003). “Generalised effective stress analysis of strength and small strains behaviour of a silty sand, from dry to saturated state.” *Soil and Foundations*, (43)4, 21-33.
- Gomes Correia, A., Anhdan, L. Q., Koseki J. e Tatsuoka, F. (2001). “Small strain stiffness under different isotropic and anisotropic stress conditions of two granular granite materials.” *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials*, Tatsuoka, Shibuya and Kuwano Eds. Balkema, Swets and Zeitlinger. 209-215.
- Gomes Correia, A., Reis Ferreira, S. M. e Araújo, N. (2006). “Triaxiais de precisão para determinação das características de deformabilidade.” *10º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, (2), 317-326.
- 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*. (31)1, 169-180.
- Hardin, B. O. e Richart, F. E. Jr. (1963). “Elastic wave velocities in granular soils.” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*. Division, ASCE, (89)SM1, 33-65.
- Hoque, E. e Tatsuoka, F. (1998). “Anisotropy in the elastic deformation of materials.” *Soils and Foundations*. (38)1, 163-179.
- Jardine, R. J., Simes, M. J. e Burland, J. B. (1984). “The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus.” *Géotechnique*. (34)3, 323-340.
- Jiang, G. L., Tatsuoka, F., Flora, A. e Koseki, J. (1997). “Inherent and stress-state-induced anisotropy in very small strain stiffness of a sandy gravel.” *Géotechnique*, (47)3, 509-521.