

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE DE MATERIAIS DE NATUREZA GRANÍTICA

INFLUENCE OF THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON THE STIFFNESS OF GRANITIC MATERIALS

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

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

RESUMO

A presente comunicação apresenta a avaliação das características de deformabilidade obtidas com recurso a um equipamento triaxial de precisão, sobre três granulometrias diferentes da mesma origem geológica (formação granítica), a saber: uma areia siltosa ($D_{50}=0.36\text{mm}$) designada de *Areia de Perafita*, e dois agregados graníticos, um (0/12.5) e outro (0/31.5). Os ensaios foram realizados sobre provetes reconstituídos por compactação sobre amostras no estado não saturado, tendo-se procedido à medição das pressões intersticiais negativas, de modo a se poderem também analisar os resultados em termos de tensões efectivas. Os resultados obtidos evidenciaram, para um determinado nível de tensão, um aumento do módulo de deformabilidade (normalizado para o mesmo índice de vazios) com a diminuição da dimensão máxima das partículas.

ABSTRACT

In this paper is presented the stiffness of three materials with the same geological origin, a silty sand designed *Perafita sand* ($D_{50}=0.36\text{mm}$) and two granite aggregates, one (0/12.5) and another (0/31.5). The stiffness of the compacted materials was studied by means of precision triaxial tests. The influence of non-saturation into the stiffness is also studied through triaxial tests with measurements of negative pore water pressures. Such measurements allow the analysis of the mechanical behaviour of the unsaturated materials in terms of effective stresses. The results obtained show, for a certain stress level, an increasing of the Young's modulus (normalised for a certain void ratio) with the decreasing of the maximum size of particles.

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia é bem reconhecida a grande importância do módulo inicial de deformabilidade ou de distorção (E_0 ou G_0), pois constitui um valor de referência na maioria dos modelos de análise numérica. A investigação efectuada nesta matéria revela-se de grande interesse, uma vez que no domínio das muito 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 quer através de ensaios dinâmicos (coluna ressonante), ou 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 de estradas e auto-estradas 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 & Tatsuoka, 1998, Gomes Correia et al., 2001) a lei de potência que descreve o módulo de deformabilidade vertical, no domínio das muito pequenas deformações, não inclui a tensão horizontal, σ_h , como variável e é dada pela equação (1). No que se refere à função de índice de vazios, normalmente, utiliza-se a função proposta por Hardin & Richart (1963), dada pela equação (2).

$$E_v = C(\sigma'_v)^n \quad (1)$$

$$F(e) = \frac{(B - e)^2}{(1 + e)} \quad (2)$$

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 os comportamentos dos solos, 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., 2002) 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 Modelo Micromecânico (Biarez et al., 1993). Neste modelo a tensão efectiva é dada pela equação (4), sendo a tensão capilar, p'_u , dada pela equação (5), onde R é o raio das esferas, γ é a tensão superficial da água (75×10^{-3} N/m a 25°C) e u_c é a sucção. Segundo os autores, a expressão pode ser aplicada a solos reais adaptando para o raio das esferas o valor de $D_{10}/2$ do solo.

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

$$\sigma'_v = \sigma_v + p'_u \quad (4)$$

$$p'_u = \frac{\pi \cdot \gamma}{2 \cdot g(e) \cdot R^2} \left[4R + \frac{3(3\gamma - \sqrt{9\gamma^2 + 8\gamma \cdot R \cdot u_c})}{u_c} \right] \quad (5)$$

$$g(e) = 0.32e^2 + 4.06e + 0.11 \quad (6)$$

A presente comunicação apresenta a avaliação das características de deformabilidade obtidas com recurso a um triaxial de precisão, sobre um *Agregado granítico* (0/12.5). Os resultados são analisados quer em tensões totais quer em tensões efectivas. Para a determinação das tensões efectivas foram utilizadas as duas abordagens descritas acima (Terzaghi e Modelo Micromecânico). Finalmente comparam-se os resultados obtidos neste material com os publicados para outros dois materiais, com a mesma natureza geológica: uma areia siltosa ($D_{50}=0.36\text{mm}$) designada de *Areia de Perafita* e um *Agregado Granítico* (0/31.5) (ver Quadro 1). A comparação dos resultados permite avaliar a influência da granulometria nas características de deformabilidade destes materiais.

2. MATERIAL E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O *Agregado Granítico* estudado (0/12.5) foi modelado a partir de um agregado de granulometria extensa (0/31.5) utilizado como material da camada de base, do pavimento do lanço Perafita/Mindelo do IC1. No Quadro 1 estão apresentadas as características geométricas dos *Agregados Graníticos* (0/12.5), (0/31.5) e da *Areia de Perafita*.

Quadro 1 – Características geométricas das curvas granulométricas.

| Material | D _{máx} (mm) | D ₁₀ (mm) | D ₃₀ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₆₀ (mm) | C _u | C _c |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|
| <i>Agregado Granítico</i> (0/12.5) | 12.5 | 0.040 ^(*) | 0.23 | 0.52 | 0.78 | 20 | 1.7 |
| <i>Agregado Granítico</i> (0/31.5) | 31.5 | 0.230 | 3.11 | 8.46 | 12.14 | 53 | 3.5 |
| <i>Areia Perafita</i> | 6.35 | 0.033 | 0.185 | 0.36 | 0.560 | 17 | 1.9 |

* Valor estimado

Para avaliar o comportamento do *Agregado Granítico*, no domínio das pequenas deformações, foi ensaiado um provete, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, recorrendo ao ensaio triaxial de precisão existente no Laboratório de Mecânica, Solos, Estruturas e Materiais da Ecole Centrale de Paris (ECP). Na Figura 1-a) é apresentada uma fotografia onde se pode ver um dos transdutores de deslocamento axial (LDT) utilizados no ensaio. Este equipamento existe actualmente também operacional na Universidade do Minho (Gomes Correia et al., 2006) (ver Figura 1-b). A compactação foi feita através de um pilão e durante o processo foram introduzidos 3 pares de elementos de referência para medição dos deslocamentos. O provete foi compactado em 6 camadas para um teor em água de 5.9% e um índice de vazios de 0.232.

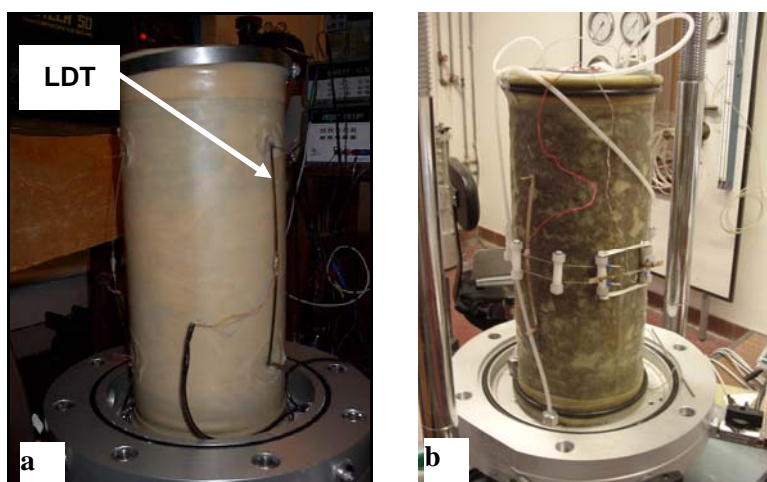


Figura 1 – Pormenor do provete e dos transdutores de deslocamento a) – equipamento utilizado na Ecole Centrale de Paris; b) – equipamento existente na Universidade do Minho.

Ao provete foram aplicadas várias tensões de confinamento (13, 52, 65 e 78 kPa). Em cada uma delas, depois de consolidado o provete, foram realizados 5 ciclos de carga descarga de pequena amplitude. Esta amplitude foi controlada de forma a garantir que os ciclos fossem fechados e lineares. Para a tensão de confinamento de 78 kPa, o provete foi sujeito a um ciclo de carga descarga de grande amplitude. Durante a descarga foram realizados ciclos de pequena amplitude por forma a avaliar o módulo de deformabilidade elástica do material, para estados de tensão

anisotrópicos. Os pequenos ciclos foram executados para valores de tensão deviatória de 25 kPa (carregamento máximo a que o provete foi sujeito), 19.5, 13.5, 6 e 0 kPa (ver Figura 2). A velocidade de carregamento foi de 0.005 mm/min.

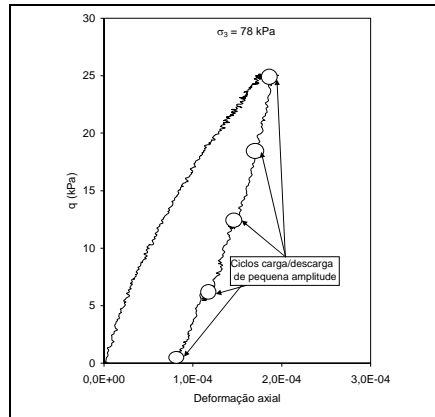


Figura 2 – Procedimento de ensaio para a tensão de confinamento 78 kPa.

3. RESULTADOS DO ENSAIO

Os valores do módulo de deformabilidade inicial foram calculados a partir da variação da tensão deviatória dividida pela deformação axial, como mostra a Figura 3. A análise dos resultados foi feita tanto em tensões totais como em tensões efectivas e os valores foram normalizados para uma tensão p_a , de valor igual a 100 kPa. Como se mostra na Figura 4 os resultados seguem uma lei de potência dada pela equação (7), idêntica à equação (1), mas incorporando a normalização da tensão.

$$E = C \left(\frac{\sigma'_v}{p_a} \right)^n \quad (7)$$

A tensão efectiva para o *Agregado Granítico* foi derivada recorrendo a duas abordagens: aplicando directamente o conceito de tensão efectiva proposto por Terzaghi e aplicando o Modelo Micromecânico (Biarez et al., 1993). Refira-se que, os valores de pressão intersticial negativa, u_w , e tensão capilar, p'_u , foram derivados de ensaios triaxiais, realizados na Ecole Centrale de Paris, onde se mediu a pressão intersticial (Reis Ferreira, 2003).

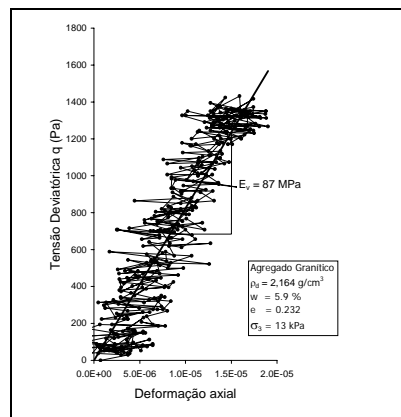


Figura 3 - Determinação do módulo de deformabilidade (E) em ciclos de carga–descarga de muito pequena amplitude.

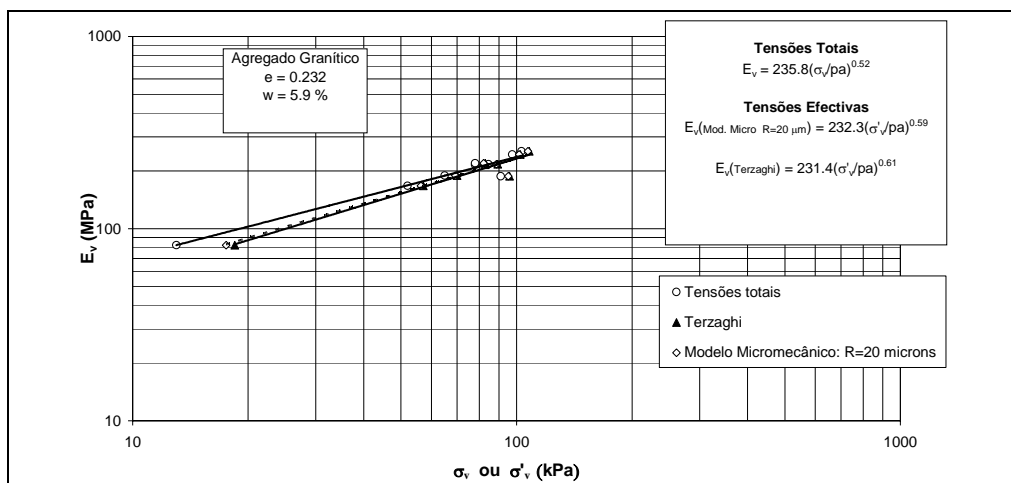


Figura 4 – Variação do módulo de deformabilidade em termos das tensões total e efectiva.

Da Figura 4 verifica-se que o comportamento do agregado, quer se utilize a abordagem de Terzaghi, quer se utilize o Modelo Micromecânico, é semelhante. Tal facto acontece porque os valores das pressões intersticiais são pequenos, o material é pouco compressível e o grau de saturação do provete é de 66.9%. Fleureau et al. (2002), analisando o comportamento da *Areia de Perafita* desde o estado seco a saturado, também constataram que a abordagem de Terzaghi pode ser utilizada para a determinação da tensão efectiva, desde que os provetes apresentem um grau de saturação elevado, em geral superior a cerca de 70%.

4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Por forma a se estudar a influência da dimensão máxima das partículas nas características de deformabilidade, compararam-se os resultados obtidos no *Agregado Granítico* (0/12.5 mm) com os resultados obtidos por Hadiwardoyo (2002) na *Areia de Perafita* (dimensão máxima das partículas é de 6.35 mm) e com os obtidos por Gomes Correia et al. (2001), num agregado granítico de granulometria extensa (0/31.5). A *Areia de Perafita* foi estudada no Laboratório de Geotecnia do Instituto Superior Técnico (IST) através de ensaios triaxiais de precisão, para um teor em água de 13.2% e um índice de vazios de 0.42. Gomes Correia et al. (2001) estudaram as características de deformabilidade através de ensaios triaxiais de precisão, de grandes dimensões, cíclicos e o teor em água e o índice de vazios ensaiados foram de 3.9 % e 0.236, respectivamente. Refira-se que estes três materiais têm todos a mesma origem geológica.

Dado que os três materiais têm a mesma origem geológica e, por não terem sido realizados ensaios específicos no *Agregado Granítico* para a avaliação da influência do índice de vazios, a função de índice de vazios adoptada foi a equação (2), adoptando para o valor de B 2.463 de acordo com a proposta de Hadiwardoyo (2002) para a *Areia de Perafita*, dada pela equação (8).

$$F(e) = \frac{(2.463 - e)^2}{(1 + e)} \quad (8)$$

Contudo, há a salientar que Kokusho & Yoshida (1997), referido por Gomes Correia et al., 2001, ao medirem as velocidades de corte em cascalhos, concluíram que o módulo de deformabilidade aumenta com a diminuição do índice de vazios, e este aumento torna-se maior com a diminuição do coeficiente de uniformidade (C_u). Mas, a razão do aumento de E com a diminuição do índice de vazios é maior com o aumento de C_u . Por esta razão, o módulo de deformabilidade deste tipo de materiais, quando for extrapolado para outro domínio de

compacidade, utilizando as equações empíricas propostas por Hardin & Richart (1963), deve ser tomado com reservas.

Os resultados obtidos, após a normalização dos valores para um índice de vazios de 0.25, em função de tensões efectivas apresentam-se na Figura 5. Uma vez que para o *Agregado Granítico* (0/31.5) não foram medidas as pressões intersticiais, admitiu-se que o comportamento do material em termos de tensões totais ou efectivas é o mesmo. De facto, dos resultados obtidos por Reis Ferreira (2003) para o *Agregado Granítico* (0/12.5) verifica-se que as pressões intersticiais negativas são pequenas, e certamente ainda mais pequenas para o agregado (0/31.5).

Analisando os resultados da Figura 5 verifica-se que, para a mesma tensão efectiva, na *Areia de Perafita* os valores do módulo de deformabilidade são mais elevados do que no *Agregado Granítico* e por sua vez, o valor do módulo de deformabilidade para a *Agregado Granítico* com a dimensão máxima das partículas de 12.5 mm, é superior ao módulo do *Agregado Granítico* com a dimensão máxima das partículas de 31.5 mm (ver correspondência com a Figura 5). Tal constatação evidencia, para as granulometrias ensaiadas, que o módulo de deformabilidade aumenta com a diminuição da dimensão máxima da partícula. Este resultado laboratorial dá suporte à constatação experimental, de que há benefício na utilização de um agregado (0/20) em vez de um agregado (0/31.5) nas camadas de base de um pavimento, não só por razões de um melhor desempenho geométrico da superfície da camada, mas também por razões estruturais.

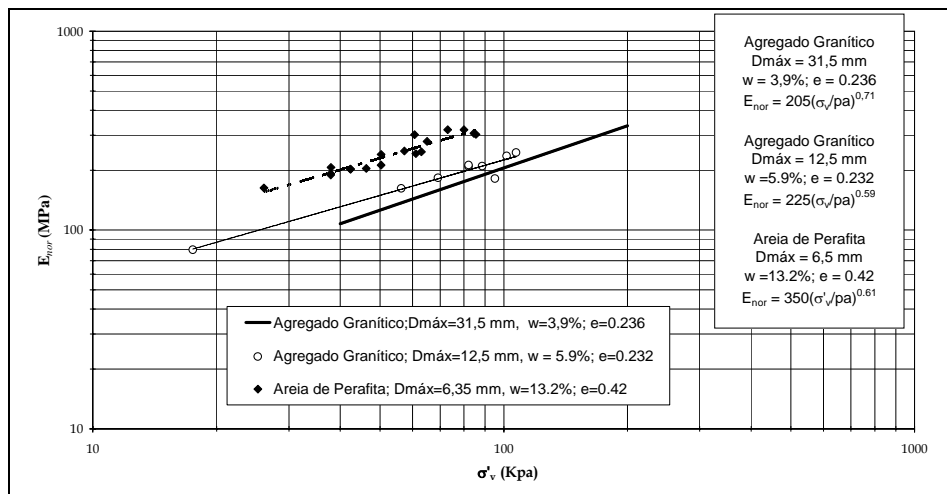


Figura 5 – Comparação dos resultados dos três materiais em tensões efectivas.

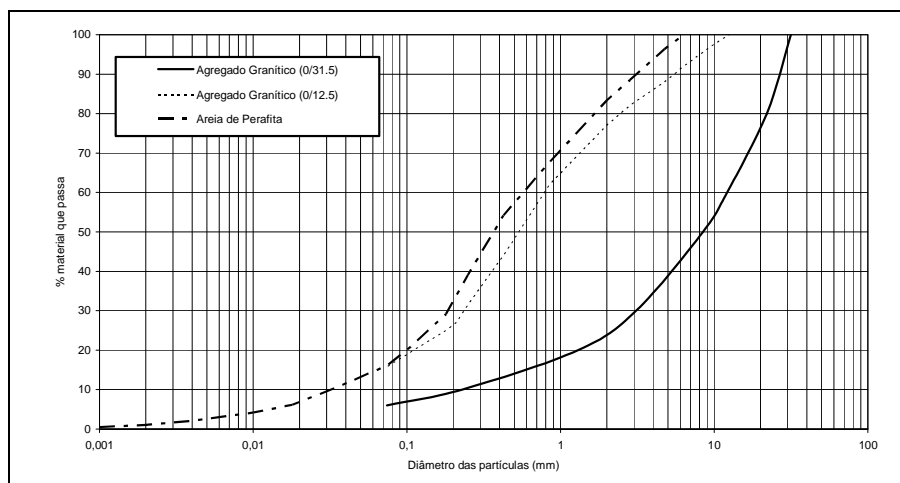


Figura 6 – Curvas granulométricas dos três materiais.

5. CONCLUSÕES

Para a estimativa das tensões efectivas no *Agregado Granítico* foram utilizadas as abordagens de Terzaghi e do Modelo Micromecânico. Este último foi escolhido, de entre todos os outros existentes na bibliografia, por se entender que permite um melhor ajuste com os dados experimentais. Comparando as duas abordagens verificou-se que, para a amostra estudada, estas conduzem praticamente ao mesmo valor. Tal facto aconteceu porque os valores das pressões intersticiais são pequenos, o material é pouco compressível e o grau de saturação do provete é de 66.9%. Verificou-se ainda que o comportamento do material, em termos de tensão total ou efectiva, se rege através de uma lei de potência, mostrando uma relação do módulo de deformabilidade vertical função da tensão vertical.

Da comparação dos resultados experimentais obtidos nos três materiais estudados: *Areia de Perafita* (dimensão máxima das partículas 6.35 mm), *Agregado Granítico* (0/12.5) e (0/31.5) verificou-se que há um aumento do módulo de deformabilidade com a diminuição do tamanho da partícula. Este resultado justifica a opção de alguns países, como por exemplo a França, em utilizar um agregado (0/20) em vez de um agregado (0/31.5) nas camadas de base de um pavimento, como é prática em Portugal. Presume-se que a opção da granulometria (0/20) garanta não só um melhor desempenho geométrico da superfície da camada, mas também um melhor comportamento mecânico da mesma.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado no âmbito do projecto GRICES/CNRS – “Security of road and railway infrastructures versus climatic changes”, desejando os autores expressar um agradecimento ao GRICES/CNRS pelo suporte financeiro concedido.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Biarez A., Fleureau J. M., Taibi S., Mechanical constitutive Model for unsaturated granular media made up by spheres, Proc. II Int. Conf. on Micromechanics of granular Media, Birmingham & Thornton Eds, Balkema, Rotterdam, (1993) pp. 51-58.
- [2] Biarez J., Liu H., Gomes Correia A., Taibi S., 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, Vol. 1 (1999) pp. 617-624.
- [3] Fleureau J. M., Hadiwardoyo S., Dufour-Laridan E., Langlois V., Gomes Correia A., Influence of suction on the dynamic properties of a silty sand, 8º Congresso Nacional de Geotecnia, A Geotecnia Portuguesa e os Desafios do Futuro, Vol. 4 (2002) pp. 2591-2601.
- [4] Fleureau J. M., Hadiwardoyo S., Gomes Correia A., Generalised effective stress analysis of strength and small strains behaviour of a silty sand, from dry to saturated state, Soil and Foundations, Vol. 43 Nº 4 (2003) pp. 21-33.
- [5] Gomes Correia A., Anhdan L. Q., Koseki J., Tatsuoka F., 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, (2001) pp. 209-215.
- [6] Gomes Correia A., Reis Ferreira, S. M., Araújo, N., Triaxiais de precisão para determinação das características de deformabilidade, 10º Congresso Nacional de Geotecnia (2006).
- [7] Hadiwardoyo S. P., Characterization of granular materials from very small to large strains, Tese de Doutoramento, Ecole Centrale Paris, (2002).

- [8] *Hardin B. O., Richart F. E. Jr.*, Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 89 N° SM1 (1963) pp. 33-65.
- [9] *Hoque E., Tatsuoka F.*, Anisotropy in the elastic deformation of materials, *Soils and Foundations*, Vol. 38 N°.1 (1998) pp. 163-179.
- [10] *Jardine R. J., Simes M. J., Burland J. B.*, The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus, *Géotechnique*, Vol. 34 N°.3 (1984) pp. 323-340.
- [11] *Jiang, G. L., Tatsuoka, F., Flora, A., Koseki, J.*, Inherent and stress-state-induced anisotropy in very small strain stiffness of a sandy gravel, *Géotechnique*, Vol. 47 N° 3 (1997). pp. 509-521.
- [12] *Reis Ferreira S. M.*, Influência da não saturação e da granulometria nas características de deformabilidade de um Agregado Granítico, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, (2003).