

# ESTUDO LABORATORIAL SOBRE AGREGADOS APLICADOS EM VIAS-FÉRREAS UTILIZANDO ENSAIOS DE CARGA TRIAXIAL CÍCLICA

## LABORATORIAL STUDY ON UNBOUND GRANULAR MATERIALS APPLIED IN RAIL TRACKS USING CYCLIC TRIAXIAL TESTS

Fortunato, Eduardo; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, efortunato@lnec.pt*  
Paixão, André; *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, apaixao@lnec.pt*  
Lopes, Diana; *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, ec06219@fe.up.pt*  
Fardilha, Rui; *Geocontrolo, Bobadela, Portugal, ruifardilha@geocontrolo.pt*  
Correia, José; *Geocontrolo, Bobadela, Portugal, josecorreia@geocontrolo.pt*

### 1 - INTRODUÇÃO

O nível de exigência imposto às modernas vias-férreas pressupõe que as deformações verticais, quer as reversíveis quer as permanentes, em particular das camadas de apoio e dos terrenos de fundação, sejam diminutas. Nestas circunstâncias, o adequado dimensionamento e a avaliação do comportamento da estrutura exige o conhecimento das propriedades mecânicas dos geomateriais, para que seja possível proceder a uma abordagem mecanicista. No entanto, de acordo com as especificações técnicas usualmente utilizadas pelas administrações ferroviárias, a caracterização dos materiais tem sido feita apenas com recurso a ensaios clássicos, com uma forte componente empírica, os quais, para além de não permitirem obter diretamente valores de grandezas utilizadas no dimensionamento estrutural, conduzem, por vezes, à rejeição de material competente.

Neste trabalho são apresentados os resultados de um estudo que pretende contribuir para demonstrar que pode não ser adequado continuar a proceder à seleção de materiais para utilizar na camada de sub-balastro, recorrendo apenas a ensaios tradicionais de caracterização, nomeadamente aqueles que estão estabelecidos nas referidas especificações técnicas. Os resultados apresentados correspondem à caracterização de dois agregados, feita tendo em conta os requisitos estabelecidos para que os mesmos possam ser aplicados como sub-balastro. Para além da caracterização laboratorial tradicional, procedeu-se à caracterização do comportamento mecânico de ambos os materiais, através da realização de ensaios triaxiais de carga cíclica, para avaliar o módulo resiliente e as deformações permanentes.

### 2 - ESTUDO DE MATERIAIS PARA SUB-BALASTRO

Os materiais que foram sujeitos a estudo no âmbito deste trabalho são dois agregados britados de granulometria extensa (ABGE), um de origem calcária (C) e outro de origem granítica (G), que têm sido aplicados em camadas de apoio de vias-férreas recentemente construídas em Portugal. Em geral, ambos os materiais cumprem os requisitos estabelecidos para os materiais e camadas de sub-balastro que estão descritos na Instrução Técnica IT.GEO.006 da REFER. No entanto, o agregado calcário apresenta um valor para o coeficiente de Los Angeles (LA) superior ao estabelecido naquela instrução técnica ( $LA > 25$ ), pelo que a sua utilização como sub-balastro ferroviário está interdita.

No âmbito da realização dos ensaios de carga triaxial cíclica, seguiram-se os procedimentos especificados na norma europeia EN 13286-7, na modalidade designada por Método A (variação em fase da tensão deviatória e da pressão de confinamento) e aplicando o conjunto de trajetórias correspondentes aos níveis mais elevados de tensão. Utilizou-se um equipamento triaxial que permite medir as deformações axiais e perimetrais dos provetes através de instrumentação local (Figura 1).

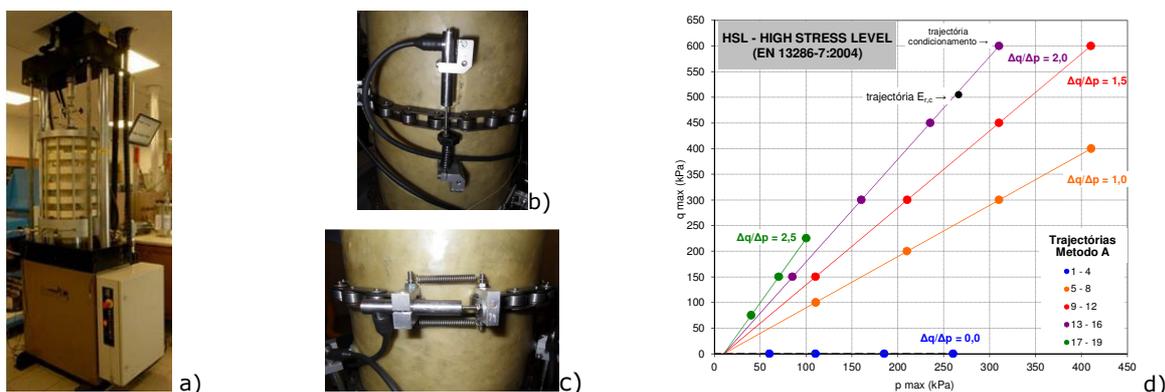


Figura 1 – Aspetos do equipamento e do procedimento de ensaio: a) vista geral do equipamento; b) pormenor do transdutor axial LVDT; c) Pormenor do transdutor perimetral LVDT; d) trajetórias de tensão aplicadas.

Foram ensaiados, a uma frequência de carga de 1Hz, provetes de 200 mm de diâmetro e 400 mm de altura, vibrocompactados, com granulometria integral (dimensão máxima das partículas 37,5 mm) e com diversos valores de teor em água (w) e de grau de compactação (GC).

Os valores do módulo resiliente ( $E_r$ ) obtidos nos ensaios aumentaram com o aumento da tensão média, como é usual em situações semelhantes. Este comportamento foi mais evidente em provetes que exibem valores de  $E_r$  mais elevados, considerando o mesmo nível de tensão aplicada. As curvas do tipo  $E_r = K_1 \theta^{K_2}$  oferecem uma boa aproximação, com o indicador de ajuste  $R^2 > 0,95$ , na maioria dos casos. Parece também poder concluir-se que, em geral, valores do teor em água mais baixos e graus de compactação mais elevados conduzem a maiores valores  $E_r$ , para o mesmo nível de tensão. Esta conclusão é mais evidente quando se considera, por exemplo,  $E_r$  determinado para os valores de tensão estabelecidos para a determinação do  $E_r$  característico (de acordo com a norma de ensaio, tensão média de 250 kPa e tensão deviatória de 500 kPa), como se apresenta na Figura 2 (a e b). Utilizou-se uma designação simplificada em que, por exemplo, "G96.3;-3.7" se refere a um provete granítico, com um grau de compactação relativa de 96,3% e com um desvio ao teor em água ótimo de referência de -3,7%. Constata-se ainda que os valores  $E_r$  obtidos sobre o calcário são idênticos ou superiores aos obtidos sobre o granito, em condições de estado semelhantes. Para esse nível de tensão, os valores para o calcário variaram entre cerca de 500 MPa e 1500 MPa e para o granito entre 350 MPa e 1200 MPa.

Para classificar os materiais, a norma de ensaio sugere que se determine: a) o valor do módulo resiliente característico ( $E_{rc}$ ), obtido em provetes com GC=97% e teor em água 2% inferior ao ótimo, para os valores de tensão acima referidos; b) o valor da deformação axial permanente característica ( $\epsilon_1^c$ ), nas mesmas condições de estado. Considerando que os provetes C95.6;-1.9 (calcário) e G99.6;-1.5 (granito) são os que exibem condições de estado mais próximas das referidas, os valores de  $E_{rc}$  foram 814 MPa e 790 MPa e os valores de  $\epsilon_1^c$  foram  $1,25 \times 10^{-3}$  e  $1,36 \times 10^{-3}$ , respetivamente. Os materiais apresentam um comportamento excelente, podendo ser classificados, segundo a norma de ensaio, na classe C1.

Numa segunda fase do trabalho foi realizado um estudo da deformação axial permanente ( $\epsilon_1^p$ ), para um milhão de ciclos de carga, de uma única trajetória de tensões, definida com o objetivo de representar as solicitações impostas à camada em serviço ( $q_{m\acute{a}x}=75$  kPa e  $p_{m\acute{a}x}=40$  kPa). Para tal, foram construídos um provete de calcário e outro de granito, com o objetivo de atingir GC=97% e um teor em água cerca de 1,5% inferior ao valor ótimo de referência. O valor de  $\epsilon_1^p$  aumentou rapidamente no início dos ensaios (Figura 2c); após um milhão de ciclos de carga foi semelhante para os dois materiais. No entanto, comparando a evolução no final de cada ensaio, conclui-se que a taxa de crescimento de  $\epsilon_1^p$  era significativamente mais elevada no granito ( $4,2 \times 10^{-7}$ /ciclo) do que no calcário ( $1,2 \times 10^{-7}$ /ciclo).

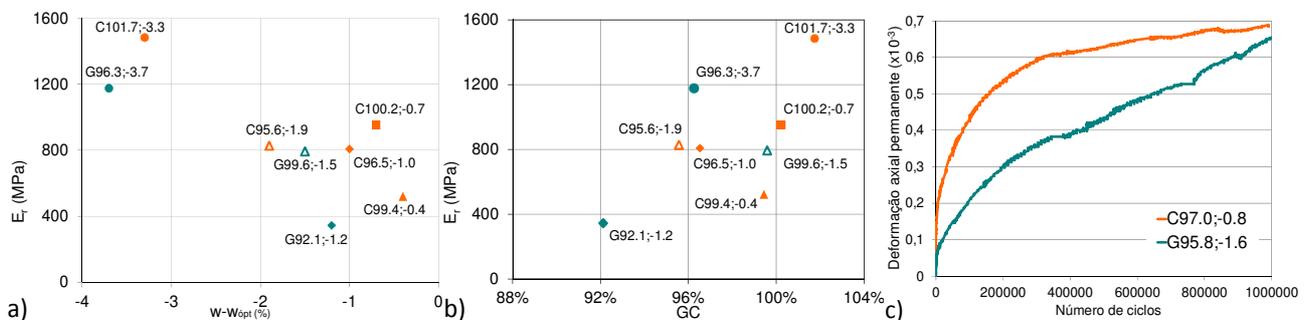


Figura 2 - Resultados dos ensaios: a) Influência de w em  $E_r$ ; b) Influência de GC em  $E_r$ ; c) evolução de  $\epsilon_1^p$ .

Em resumo, o agregado calcário, apesar de evidenciar uma maior fragmentação das suas partículas (maior LA), demonstrou um bom desempenho, quando comparado com o material granítico, quer em termos resilientes quer na deformação permanente. Assim, parecem não existir razões objetivas para impedir que este material possa vir a ser utilizado na camada de sub-balastro, até porque se constatou, noutros estudos, que a sua granulometria não sofre alteração durante o processo construtivo. Nestas circunstâncias, é necessário continuar a desenvolver estudos semelhantes aos que se apresentaram neste trabalho, nomeadamente considerando várias condições de estado para os materiais e avaliando a deformação permanente sob diversos níveis de tensão, para vários milhões de aplicações de carga, de forma a aprofundar os conhecimentos, a obter, de forma eficiente, adequados indicadores de comportamento e a tornar mais económicas e ambientalmente sustentáveis este tipo de infraestruturas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa *Geocontrol* o apoio concedido à realização dos ensaios da tese de mestrado no âmbito da qual se desenvolveram os estudos apresentados neste trabalho.