

SEMINÁRIO SOBRE AGREGADOS



**AGREGADOS NÃO LIGADOS EM
CAMADAS DE PAVIMENTOS E
VIAS FÉRRIAS.
CARACTERIZAÇÃO
LABORATORIAL E MODELAÇÃO
DO COMPORTAMENTO**

Prof. A. Gomes Correia
Universidade do Minho (UM)

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

31 de Março de 2003

AGREGADOS NÃO LIGADOS EM CAMADAS DE PAVIMENTOS E VIAS FÉRREAS. CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL E MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO

UNBOUND GRANULAR MATERIALS IN PAVEMENT AND RAILWAY LAYERS. LABORATORY CHARACTERISATION AND MODELLING

GOMES CORREIA, ANTÓNIO

Universidade do Minho

Departamento de Engenharia Civil

Campus de Azurém

4800-058 Guimarães

AGC@civil.uminho.pt

RESUMO

O presente trabalho refere-se os ensaios de caracterização laboratorial de agregados e em particular os que permitem a obtenção de parâmetros mecânicos necessários à modelação do comportamento do material, bem como à sua classificação. Dá-se destaque ao ensaio triaxial de precisão com aplicação de cargas cíclicas e às teorias que permitem a interpretação dos resultados, quer numa perspectiva da modelação do comportamento, quer da classificação do material. Por fim mostra-se a insuficiência dos ensaios apenas baseados na caracterização das partículas, justificando-se assim a necessidade de ensaios de caracterização relacionados com o comportamento integral do material na camada da estrutura.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas dos pavimentos e das vias férreas são das estruturas de engenharia civil as mais difíceis de conceber e de dimensionar. De facto, estas estruturas são obras lineares construídas sobre o terreno, o qual pode variar desde um solo a uma rocha e dentro de cada um deste tipo de materiais há ainda uma grande variabilidade das respectivas propriedades, físicas, hidráulicas e mecânicas. Além disso, estas estruturas são construídas com materiais naturais, cujas propriedades variam também consideravelmente. Acresce ainda para a complexidade do sistema que as cargas aplicadas são variáveis e aplicadas repetidamente podendo atingir mais do milhão de aplicações de carga durante a vida útil da estrutura. Estas cargas, por serem cargas rolantes, conduzem à rotação das tensões principais nas camadas granulares constituintes das estruturas. São estas complexidades associadas às acções actuantes na estrutura e aos materiais que a constituem e sobre os quais assenta, que caracterizam a respectiva análise e dimensionamento.

Os materiais granulares que integram as estruturas dos pavimentos e das vias férreas são constituídos por uma série de partículas de diferentes dimensões, cuja dimensão máxima e gama de dimensões são controladas pelas funções a desempenhar pela camada granular na respectiva estrutura. Estes materiais podem ser utilizados na estrutura dos pavimentos (camadas de base, sub-base e leito do pavimento) e na estrutura da via férrea (camadas de balastro, sub-balastro e leito de via). Naturalmente que as funções destas camadas variam com o tipo de estrutura, sendo que nos pavimentos estas funções serão diferentes de um pavimento flexível para um pavimento

rígido. Os ensaios de caracterização laboratorial estão associados às diferentes especificações que estabelecem os requisitos dos materiais para poderem ser usados nestas diferentes funções.

Esta comunicação passa em revista os diferentes ensaios de caracterização laboratorial orientando-se depois para os relativos ao comportamento dos materiais granulares mais relevantes do ponto de vista da engenharia, ou seja os ensaios de caracterização mecânica, pese embora os ensaios de caracterização hidráulica serem também muito importantes, particularmente para os materiais não tradicionais. Por fim aborda-se a interpretação destes ensaios na perspectiva da modelação e da classificação dos materiais.

2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL

Os ensaios laboratoriais de agregados não ligados são geralmente divididos em duas grandes categorias: ensaios de caracterização das partículas e ensaios de caracterização do material (mistura de agregados). Num inquérito realizado no âmbito de uma acção COST 337 "Unbound Granular Materials for Road Pavements, 1996-2000" constatou-se a utilização de diferentes ensaios nos diferentes países, resultante certamente de razões de natureza geológica, climática e histórica. As Figuras 1 e 2 resumem os diferentes ensaios praticados pelos diferentes países Europeus participantes desta acção COST 337, indicando-se para cada ensaio o número de países que o utilizam. Esta informação está discretizada nas Figuras 3 e 4 em termos de três níveis de utilização: prática corrente, utilização menos frequente e investigação.

Os ensaios de simples caracterização das partículas servem propósitos de classificações empíricas, sendo úteis para a caracterização do material ao nível da extracção e da central de produção. Contudo, são manifestamente insuficientes para caracterizar o comportamento do material integral. Estes ensaios são praticados na maioria dos países e objecto de normas europeias. A excepção diz respeito aos ensaios relacionados com a segurança ambiental (lixiviação), que são de origem mais recente e onde há ainda muito trabalho a desenvolver de modo a os tornar mais representativos das reais condições locais. Atendendo à natureza empírica de alguns destes ensaios, devem, portanto, ser utilizados com reservas para os materiais não tradicionais (reciclados, sub-produtos industriais, materiais de demolição, etc.).

Os ensaios de caracterização do material integral compreendem os ensaios de identificação (granulometria e compactação) e os ensaios relacionados com o seu comportamento na camada, quer em termos mecânicos, quer hidráulicos. Os ensaios de identificação são, à semelhança dos ensaios de caracterização das partículas, praticados na maioria dos países e objecto de normas europeias (CEN). Esta situação é completamente diferente da dos ensaios relacionados com o seu comportamento na camada. Neste caso, embora praticados em vários países, tratam-se de ensaios realizados no âmbito de estudos de investigação, sendo, portanto, ainda necessário um grande trabalho de normalização e de implementação na prática corrente.

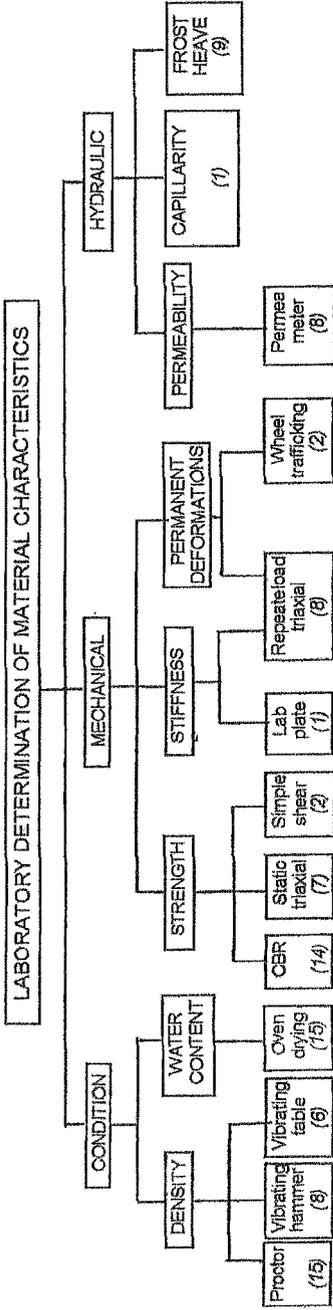
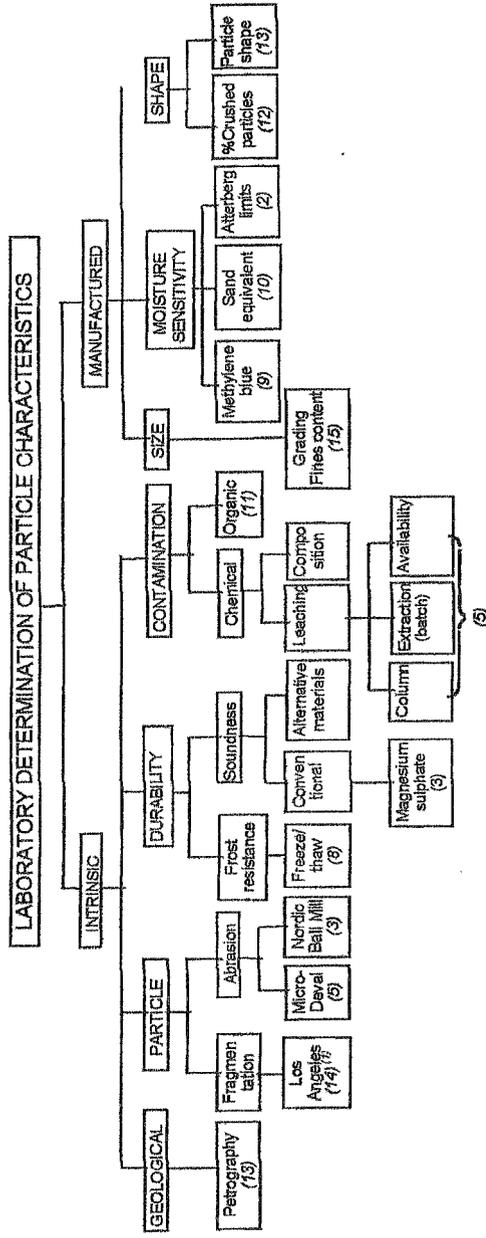


Figura 1. Classificação dos ensaios de caracterização das partículas



(1) the figures in italics indicate the total number of countries using each test (out of the 15 that have responded).

Figura 2. Classificação dos ensaios de caracterização do material integral

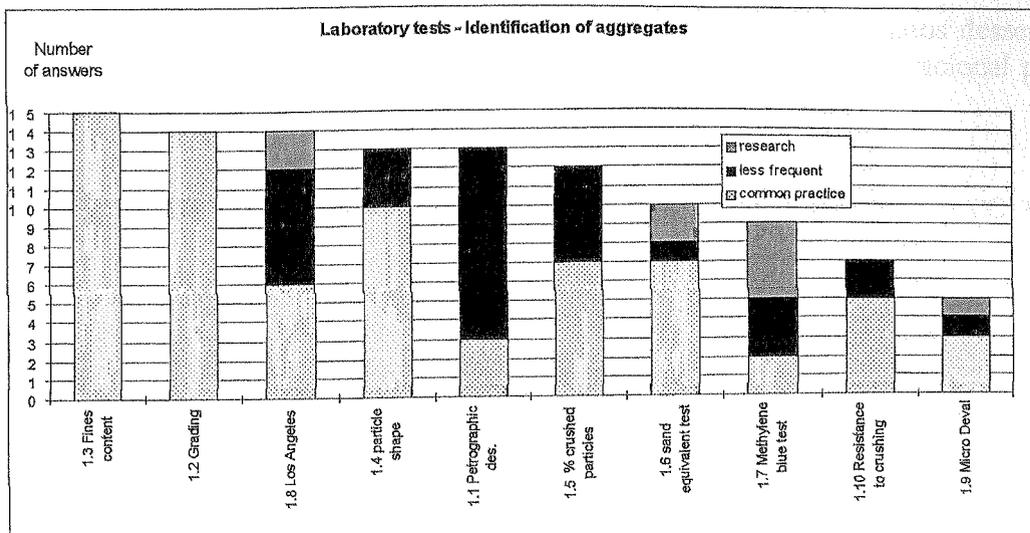


Figura 3. Ensaios de laboratório utilizados na caracterização das partículas

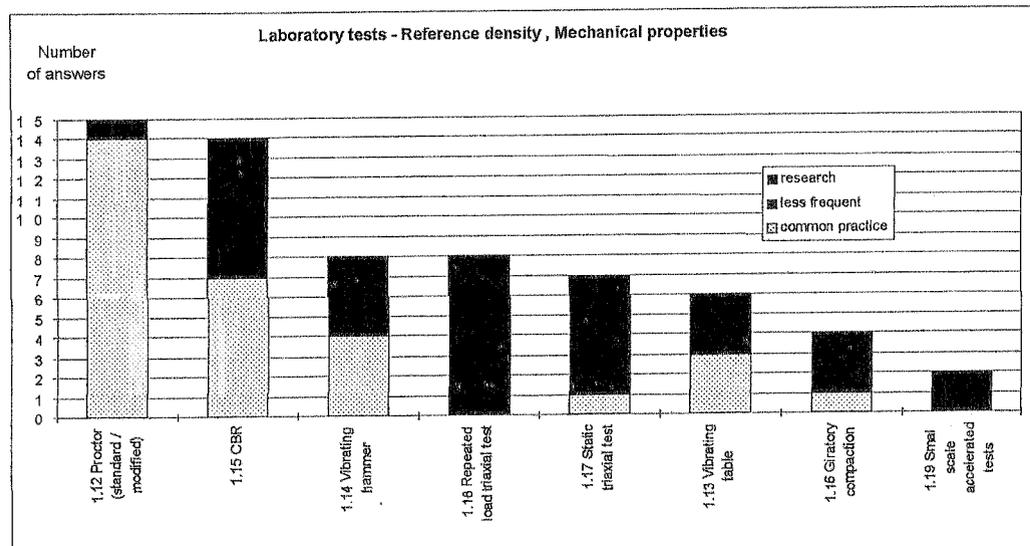


Figura 4. Ensaios de laboratório utilizados na caracterização do material integral

De facto há todo o interesse em evoluir-se dos ensaios de simples identificação das partículas para os ensaios de caracterização do comportamento do material integral. Dentro desta última categoria de ensaios interessam sobretudo os ensaios que permitam obter relações tensoriais e não escalares como é o caso dos ensaios de simples caracterização. Anote-se desde já as dificuldades na obtenção dessas relações tensoriais, em virtude destas dependerem de vários factores, como sejam a compactidade relativa, o teor em água e os estados de tensão e de deformação. Daqui resulta o investimento, em termos de caracterização, que tem vindo a ser feito nos últimos anos recorrendo a ensaios mecânicos sobre o material integral em condições de estado (teor em água e compactidade relativa) e sob trajectórias de tensões representativas das condições "in situ". Além disso, tem-se também dado maior atenção à caracterização hidráulica do material integral, particularmente no caso dos materiais não tradicionais (ensaios de lixiviação).

Na presente comunicação optou-se por incidir sobretudo nos ensaios mecânicos relacionados com o comportamento do material na camada. Estes ensaios servirão ao estabelecimento de modelos de comportamento do material, os quais poderão ser utilizados na modelação das

estruturas e no respectivo dimensionamento. Além disso, os resultados desses ensaios servirão também para utilizar numa classificação mecânica, que se julga mais racional para a escolha dos materiais para as diferentes funções nas camadas das estruturas.

3 CARACTERIZAÇÃO E MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

3.1 Fundamentos de geomecânica

Os agregados não ligados utilizados nas camadas das estruturas dos pavimentos e das vias férreas, podem apresentar uma granulometria extensa ou uniforme. Os materiais de granulometria relativamente uniforme são autodrenantes, como é o caso dos materiais das camadas de balastro. No caso dos materiais de granulometria extensa, a água existente nos vazios entre as partículas é condicionante do respectivo comportamento mecânico, devendo este ser interpretado com recurso ao princípio das tensões efectivas no caso de todos os vazios estarem preenchidos com água ou através da teoria dos materiais não saturados no caso destes estarem parcialmente preenchidos com água, coexistindo portanto ar e água nos vazios. Este último tipo de análise envolve alguma complexidade, sendo em alternativa feita uma análise em termos de tensões totais.

O comportamento mecânico dos agregados não ligados nas camadas dos pavimentos e das vias férreas deve ser analisado sob três aspectos: resistência mecânica, rigidez e resistência às deformações permanentes. Destes três, a resistência mecânica é aparentemente a menos considerada nos ensaios mecânicos, visto que numa estrutura rodoviária ou ferroviária o material raramente rompe sob uma carga monotónica (um único carregamento), mas antes sob a acção repetida de várias cargas rolantes. Anote-se que a consideração de modelos de comportamento elastoplásticos para estes materiais deverá considerar a forte dependência da resistência destes materiais com o estado de tensão como ilustra a Figura 5. Acresce ainda salientar que no caso dos balastros a resistência mecânica pode também ser necessária para análises de estabilidade dos aterros integrando a estrutura da via e conseqüentemente a camada de balastro.

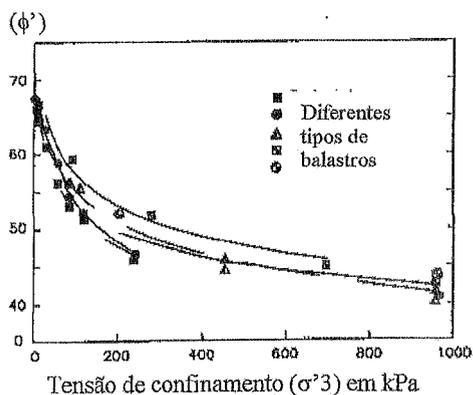


Figura 5. Influência da tensão de confinamento no ângulo de atrito para diferentes tipos de balastros (Indraratna et al., 1998)

Os aspectos mais estudados têm sido de facto a rigidez (comportamento reversível) e o comportamento do material às deformações permanentes sob acção das cargas rolantes (cargas cíclicas), por serem aqueles que são considerados nos métodos de análise estrutural dos pavimentos e das vias férreas. Estes aspectos do comportamento mecânico têm sido estabelecidos através de ensaios triaxiais de precisão de cargas cíclicas.

3.2 Ensaios triaxiais

O ensaio de caracterização mecânica em laboratório que permite obter parâmetros para a modelação do comportamento não linear do material e para o dimensionamento da estrutura é sem dúvida o ensaio triaxial. Este ensaio requer, contudo, algumas modificações em relação ao triaxial clássico utilizado para obtenção dos parâmetros de resistência ao corte. Estas modificações envolvem a utilização de medições internas na câmara, como sejam a força axial e a pressão lateral ou de confinamento. Além disso, requer ainda sistemas de medição das deformações montados directamente na amostra de ensaio, permitindo medir extensões, quer axiais, quer radiais da ordem de 10^{-6} . Estas tecnologias de medição encontram-se descritas em Gomes Correia (2000). A Figura 6 representa esquematicamente uma câmara triaxial instrumentada com um sistema de medição dos deslocamentos com recurso a LVDT's. Além disso, o sistema de carregamento deve preferencialmente poder variar, em fase, a tensão deviatória e a tensão de confinamento, permitindo assim a realização de ensaios a tensão lateral variável (TLV), mais representativos que os ensaios a tensão lateral constante (TLC), em que apenas a tensão deviatória é variável. Estes dois tipos de carregamento estão considerados na pré norma europeia elaborada pelo CEN TC 227/WG 4/TG 2: prEN 13286-7 (2003), sendo designados respectivamente por métodos A e B.

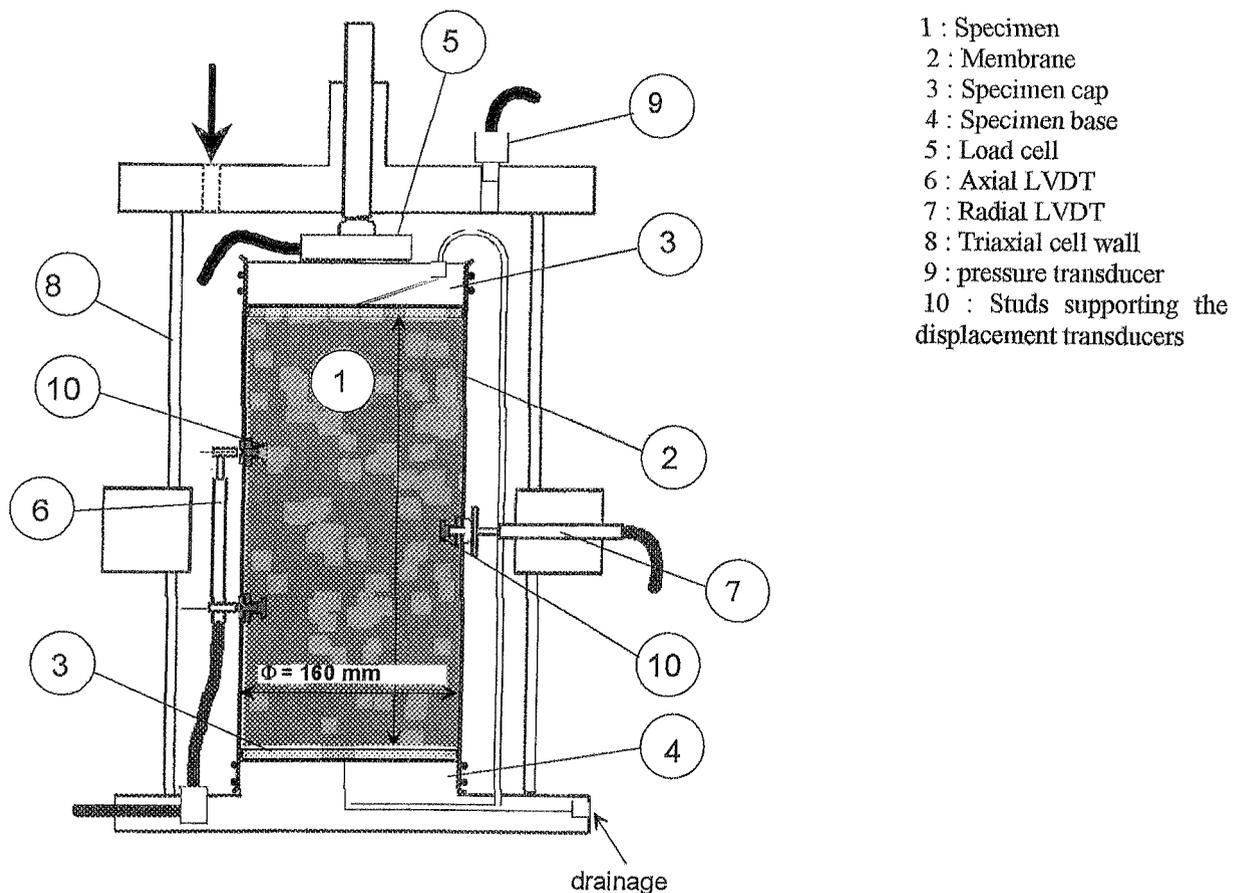


Figura 6. Exemplo de um esquema de medição dos deslocamentos directamente no provete de material através de LVDT's (prEN 13286-7, 2003)

A Figura 7 apresenta um exemplo de trajetórias de tensão estabelecidas para o estudo do comportamento reversível dos materiais granulares de muito boa qualidade a serem utilizados nas camadas de base dos pavimentos flexíveis com camadas betuminosas com espessuras da ordem dos 0.08 m. Para materiais a serem utilizados em camadas de sub-base e noutras estruturas os níveis de tensão devem ser ajustados. A actual versão da pré norma de ensaios estabelece, para cada método de carregamento trajetórias de tensão com dois níveis de amplitudes diferentes, pretendendo cobrir as situações acima referidas.

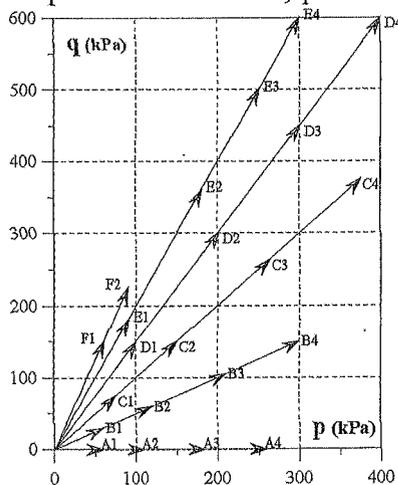


Figura 7. Exemplo de trajetórias de tensão de ensaios triaxiais tipo TLV

Estas trajetórias de tensão destinam-se ao estudo do comportamento reversível do material, sendo todas elas aplicadas sobre o mesmo provete, envolvendo a aplicação de 100 ciclos por trajetória. Previamente a estes carregamentos o material é acondicionado (estabilização das deformações permanentes) com um pré carregamento de 20 000 ciclos com a trajetória de tensão mais severa (trajetória E4 para o caso apresentado na Fig. 7).

O sistema de carregamento deve ainda possibilitar a aplicação de um grande número de ciclos (80 000) para estudar o comportamento do material às deformações permanentes. Neste caso é utilizado um provete para cada trajetória de tensão. Por razões de tempo de execução do ensaio as trajetórias de tensão são em número muito mais reduzido das utilizadas para o estudo do comportamento reversível.

3.3 Condições de estados dos materiais a ensaiar

Os materiais a ensaiar devem apresentar as condições de estado (compacidade relativa e teor em água) representativas das condições "in situ" previstas durante a vida da obra. Para o estudo dos agregados não ligados para as camadas de pavimentos estabeleceram-se para a realização dos ensaios triaxiais as gamas de variação indicadas no Quadro 1.

Quadro 1 — Exemplo das condições de estado de preparação dos provetes

Teor em água (%)			Massa volúmica seca
W_{OPM-4}	W_{OPM-2}	W_{OPM-1}	ρ_d
	1 provete		100 % $\rho_{d\ OPM}$
1 provete	2 provetes	1 provete	97 % $\rho_{d\ OPM}$
	1 provete		95 % $\rho_{d\ OPM}$

onde: W_{OPM} é o teor em água do Proctor Modificado (PM); $\rho_{d\ OPM}$ é a massa volúmica seca máxima do PM.

3.4 Interpretação dos ensaios. Modelação do comportamento

3.4.1 Comportamento reversível

A modelação do comportamento reversível pode ser feita, na hipótese de comportamento elástico e linear, recorrendo à lei de Hooke generalizada:

$$E_r = \frac{(\sigma_{1d} - \sigma_{3d})(\sigma_{1d} + 2\sigma_{3d})}{\varepsilon_{1r}(\sigma_{1d} + \sigma_{3d}) - 2\varepsilon_{3r}\sigma_{3d}}$$

onde:

E_r	[MPa]	Módulo reversível dependente do estado de tensão
ε_{1r}	[-]	extensão axial reversível
ε_{3r}	[-]	extensão radial reversível
σ_{1d}	[kPa]	amplitude da tensão axial
σ_{3d}	[kPa]	amplitude da tensão lateral

No caso de se considerar um comportamento elástico não linear, mais realista do observado nos materiais granulares, poder-se-á utilizar o modelo proposto por Boyce (1980), considerando o material isotrópico. Este modelo utiliza as seguintes variáveis:

$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 = \text{tensão normal média}$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) = \text{tensão deviatórica}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = \text{extensão volumétrica}$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) = \text{extensão distorcional}$$

O modelo de Boyce pode ser expresso em termos do módulo de compressão volumétrica (K) e do módulo de distorção (G).

$$K = \frac{p}{\varepsilon_v} \quad G = \frac{q}{3\varepsilon_q}$$

Os valores de K e G, expressos em termos secantes, dependem do estado de tensões através das seguintes relações:

$$K = \frac{\left(\frac{p}{p_a}\right)^{1-n}}{\frac{1}{K_a} + \frac{(n-1)}{6G_a} \left(\frac{q}{p}\right)^2}$$

$$G = G_a \cdot \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1-n}$$

Tais expressões traduzem as relações tensões-extensões seguintes:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{K_a} \frac{p^n}{p_a^{n-1}} \left[1 + \frac{(n-1)K_a}{6G_a} \left(\frac{q}{p}\right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{3G_a} \frac{p^n}{p_a^{n-1}} \frac{q}{p}$$

Este modelo foi posteriormente modificado para poder contemplar o comportamento anisotrópico exibido por alguns materiais (Hornich et al., 1998). Tal modificação consistiu na introdução de um coeficiente de anisotropia γ , afectando assim as variáveis:

$$p^* = (\gamma\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$$

$$q^* = (\gamma\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$\varepsilon_v^* = \varepsilon_1/\gamma + 2\varepsilon_3$$

$$\varepsilon_q^* = \frac{2}{3}(\varepsilon_1/\gamma - \varepsilon_3)$$

As expressões dos módulos secantes virão então:

$$K^* = \frac{\left(\frac{p^*}{p_a}\right)^{1-n}}{\frac{1}{K_a} + \frac{(n-1)}{6G_a} \left(\frac{q^*}{p^*}\right)^2}$$

$$G^* = G_a \left(\frac{p^*}{p_a}\right)^{1-n}$$

Tais expressões traduzem as relações tensões-extensões seguintes:

$$\varepsilon_v^* = \frac{1}{K_a} \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \left[1 + \frac{(n-1)K_a}{6G_a} \left(\frac{q^*}{p^*}\right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_q^* = \frac{1}{3G_a} \frac{p^{*n} q^*}{p_a^{n-1} p^*}$$

O ajustamento aos resultados dos ensaios é feito pelo método dos mínimos quadrados, minimizando as seguintes diferenças para as N trajetórias de tensão:

$$\sum_{i=1}^N [\Delta \varepsilon_{1\text{measured}}^i - \Delta \varepsilon_{1\text{calculated}}^i]^2 \quad \sum_{i=1}^N [\Delta \varepsilon_{3\text{measured}}^i - \Delta \varepsilon_{3\text{calculated}}^i]^2$$

A Figura 8 mostra um ajustamento menos adequado do modelo de Boyce aos resultados triaxiais de um ensaio do tipo TLV, enquanto que a Figura 9 mostra para esses mesmos resultados o melhoramento significativo conseguido considerando o material anisotrópico. A validação do modelo anisotrópico foi feita com sucesso na aplicação na modelação de duas estruturas de pavimento flexível instrumentadas para o efeito (Neves, 2002).

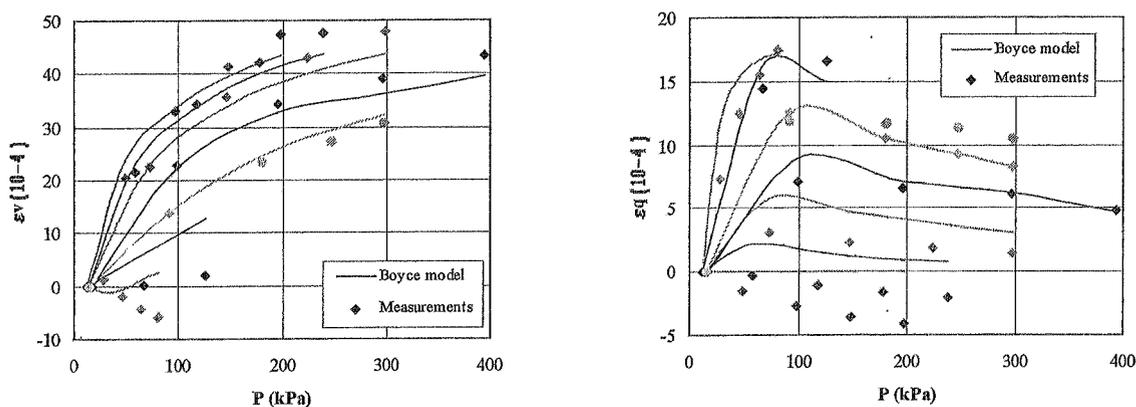


Figura 8. Ajustamento do modelo de Boyce aos resultados do ensaio triaxial TLV de um agregado (Gomes Correia, 2000,a)

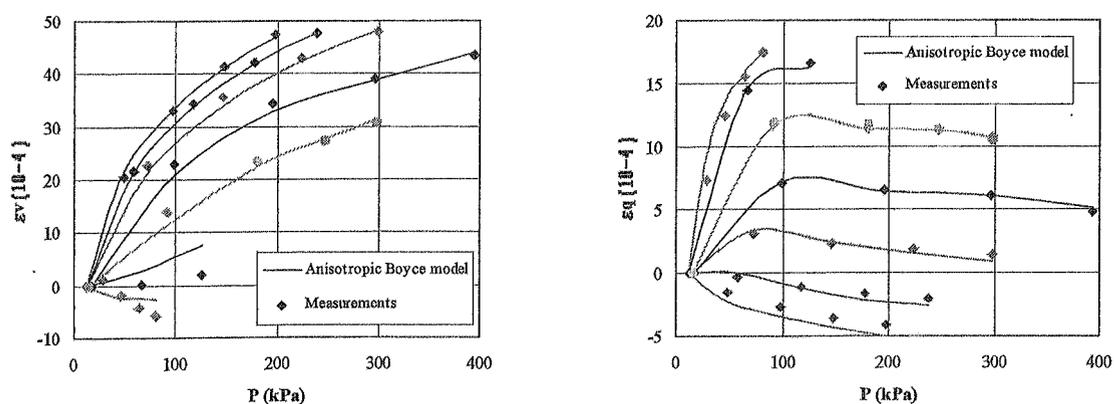


Figura 9. Ajustamento do modelo anisotrópico aos resultados do ensaio triaxial TLV da Fig. 8 (Gomes Correia, 2000,a)

3.4.2 Comportamento às deformações permanentes

Para a modelação das deformações permanentes poder-se-á utilizar o modelo proposto por Paute et al. (1994):

$$\varepsilon_{1p}^*(N) = A_1 \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right]$$

onde:

- A_1 é um parâmetro do tipo razão de extensão
- B é um parâmetro
- ε_{1p}^* é a extensão axial permanente, retirando o valor correspondente aos 100 primeiros ciclos.
- N é o número de ciclos

O estudo do comportamento às deformações permanentes dos materiais granulares necessita de ser prosseguido, quer em termos experimentais, quer de modelação numérica.

4 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS

Uma classificação racional dos agregados não ligados deve integrar os principais parâmetros responsáveis pelo seu comportamento na camada da estrutura, que são: o módulo reversível do material associado a um determinado estado de tensão e um parâmetro ligado às deformações permanentes. Originalmente esta classificação foi proposta por Paute et al. (1994), baseada nos parâmetros mecânicos associados às seguintes condições de estado: teor em água $w = w_{OPM} - 2$ % e massa volúmica $\rho_d = 0,97 \times \rho_{dOPM}$. Os parâmetros mecânicos adoptados foram:

- o valor característico (A_{1c}) do parâmetro A_1 do modelo associado às deformações permanentes (ver 3.4.2), mas determinado no ajustamento dos resultados obtidos durante a fase de pré carregamento (trajectória de tensão: $p=300$ kPa e $q=600$ kPa) para estudo do comportamento reversível;
- o valor característico (E_c) do módulo reversível correspondente ao estado de tensão: $p=250$ kPa e $q=500$ kPa.

Esta classificação foi adoptada num estudo feito sobre dois agregados calcários provenientes da Pedreira de Calhariz (Castelo Branco, 1996) como se ilustra na Figura 10. Nesta figura foram integrados outros resultados provenientes de estudos realizados pelo "Laboratoire Regional des Ponts et Chaussées de Saint Briec". É interessante constatar que esta classificação mecânica baseada em determinadas condições de estado do material integral conduz a resultados bem diferentes de uma outra classificação empírica baseada na resistência mecânica das partículas (Fig. 11) e de grande utilização internacional, e muito particularmente em França.

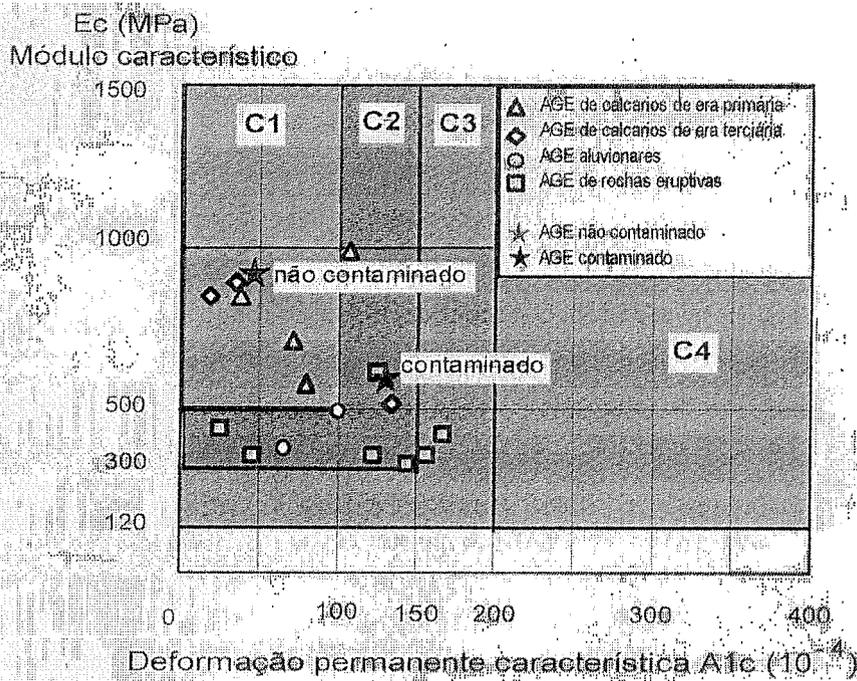


Figura 10. Classificação mecânica do material integral para determinadas condições de estado ($w = w_{OPM} - 2\%$; $\rho_d = 0,97 \times \rho_{dOPM}$)

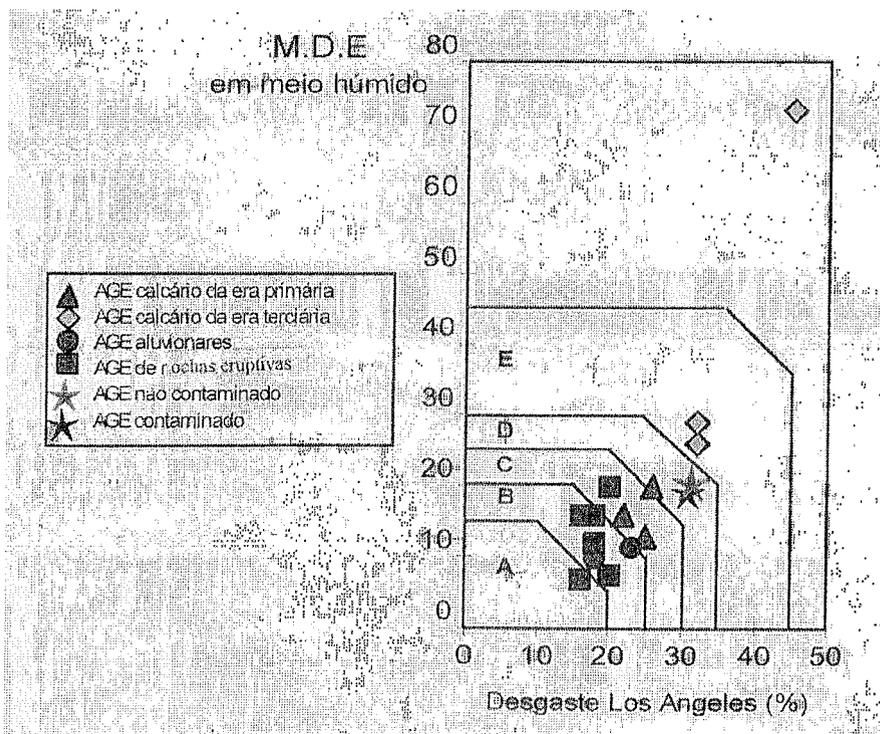


Figura 11. Classificação baseada nas características mecânicas das partículas.

Anote-se que o comportamento dos materiais granulares pode ser muito sensível às condições de estado como ilustram as Figuras 12 e 13 para os resultados obtidos num agregado granítico (Gomes Correia, 2000,b).

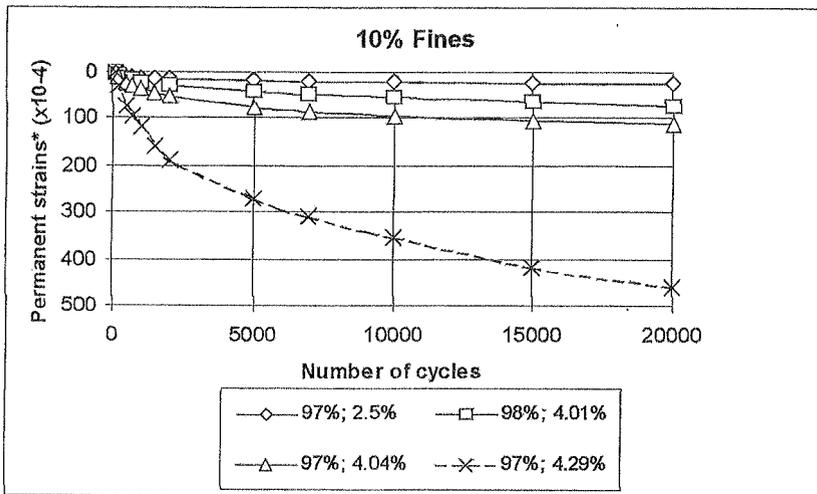


Figura 12 Influência do teor em água nas estensões permanentes para um agregado granítico com 10% de finos ($\rho_d = 0,97 \times \rho_{dOPM}$)

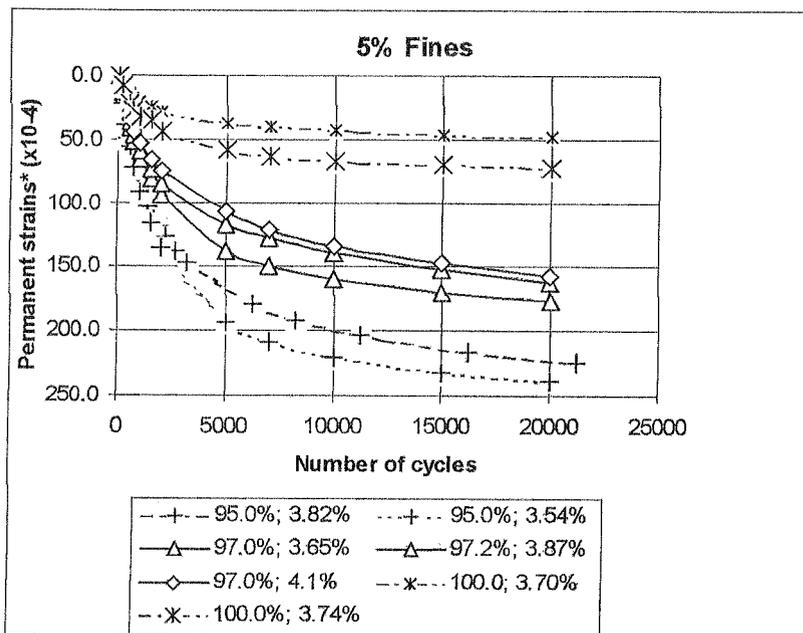


Figura 13. Influência da compactação na extensão permanente de um agregado granítico com 5% de finos e com um teor em água w de cerca de $w_{OPM} - 2\%$

Estes resultados evidenciam a importância da representatividade das condições de estado do material na simulação dos estudos de laboratório.

5 CONCLUSÕES

A caracterização laboratorial dos agregados não ligados baseada apenas no estudo das partículas é manifestamente insuficiente para permitir deduzir propriedades do comportamento integral do material nas camadas das estruturas, quer rodoviárias, quer ferroviárias. Estes ensaios conduzem portanto a uma insuficiente caracterização do material, por um lado para o dimensionamento das estruturas e por outro na sua utilização racional.

Para avaliação dos parâmetros de comportamento mecânico do material integral o ensaio triaxial de precisão parece ser o mais apropriado. O material pode ser ensaiado sob trajectórias de tensão

representativas das cargas induzidas pelos veículos (à exceção da rotação das tensões principais) e sob condições de estado (teor em água e compactidade relativa) representativas do material "in situ" sob determinadas condições climáticas. A não linearidade da relação tensão-extensão do material pode assim ser estabelecida através de vários modelos de comportamento do material e utilizada na modelação do comportamento da estrutura e no respectivo dimensionamento.

Quanto à caracterização do material relativamente à resistência às deformações permanentes, o ensaio triaxial de cargas cíclicas parece também ser um ensaio muito promissor, pelo menos no estado actual dos conhecimentos. Este ensaio, num estado de desenvolvimento bem inferior ao da caracterização da deformabilidade do material, necessita ainda de um grande investimento no estabelecimento de procedimento de ensaio. Além disso, há também necessidade de desenvolver modelos de comportamento do material para a modelação das deformações permanentes às cargas cíclicas, que possam ser utilizados na modelação da estrutura e no respectivo dimensionamento.

A avaliação da sensibilidade do comportamento mecânico do material à água deve também ser efectuada. Embora este aspecto seja avaliado indirectamente através dos ensaios empíricos de equivalente de areia e de azul de metileno, é necessária a sua quantificação mecânica através dos ensaios relacionados com o comportamento do material. Para o efeito, estes ensaios (entenda-se ensaios triaxiais) devem ser conduzidos sobre provetes do material cobrindo a gama de teores em água representativa da esperada "in situ".

REFERÊNCIAS

- Boyce, J. R., 1980. "A Non-linear Model for the Elastic Behaviour of Granular Materials under Repeated Loading". International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, United Kingdom.
- Castelo Branco, F.V.M. (1996). *Estudo da Influência de uma Contaminação no Comportamento Mecânico de um Agregado Calcário de Granulometria Extensa*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra-Faculdade de Ciência e Tecnologia, 159 pp.
- CEN prEN 13286-7 (2003). "Unbound and hydraulic bound mixtures for roads" – Test methods. Cyclic load triaxial test. Draft. : CEN/TC227/WG4/TG2.
- Gomes Correia, A. (2000,a). "Unbound Granular Materials – laboratory testing, in-situ testing and modeling". Balkema, The Netherlands, 289 pp.
- Gomes Correia, A. (2000, b). "Influence of Compaction Conditions on the Resilient and Permanent Deformations of Aggregates Mixtures of Granite". *Compaction of Soils and Granular Materials* (Gomes Correia & Quibel eds.), Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 27-39.
- Hornych P, Kazai A, Piau J-M (1998), "Study of the Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials". Proceedings BCRA '98 Trondheim, Volume 3, pp.1277-1287.
- Indraratna, B., Ionescu, D. & Christie, H.D. 1998. "Shear behavior of railways ballast based on large-scale triaxial tests". In *ASCE Journal of Geot. Et Geoenv. Eng* 124 (5).

Paute J L, Hornych P and Benaben J P (1994) "*Comportement Mécanique des Graves Non Traitées*". Bulletin Liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées 190, pp.27-38.

Neves, J. M. C., 2001. *Contribution to the Structural Behaviour Modelling of Flexible Road Pavements* (in Portuguese). PhD Dissertation, Universidade Técnica de Lisboa.