

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS BRITADOS NÃO LIGADOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

STUDY OF THE UNBOUND CRUSHED MATERIALS BEHAVIOUR IN ROAD PAVEMENTS

Luzia, Rosa, *Departamento de Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal, rluzia@est.ipcb.pt*

Picado-Santos, Luís, *Departamento de Engenharia Civil da FCT da Universidade de Coimbra, Portugal, picsan@dec.uc.pt*

RESUMO

O comportamento dos materiais britados de granulometria extensa em camadas de pavimentos, apesar de alguns estudos já realizados nesse sentido, não se encontra ainda suficientemente caracterizado. Para contribuir para o melhor conhecimento desse comportamento está a desenvolver-se um trabalho cujo objectivo principal é a caracterização mecânica e a elaboração de modelos típicos de comportamento para materiais britados de diferentes litologias, passíveis de serem utilizados em camadas de sub-base ou base de pavimentos rodoviários. Esta comunicação descreve os resultados obtidos até ao momento num dos tipos de material em estudo, o calcário. Essencialmente, é possível avaliar qual a gama de variação do módulo resiliente obtido em ensaios triaxiais cíclicos para o material calcário de que também se fornece a caracterização geotécnica. Finalmente, resume-se o trabalho que ainda se espera desenvolver.

ABSTRACT

The behaviour of crushed materials of extended grading in the unbounded granular layers of road pavements, in spite of some studies already developed on that matter, is not yet characterized enough. In the attempt to contribute to a better knowledge of that behaviour a work is being developed, which main objectives are the mechanical characterization and the elaboration of typical models of behaviour for crushed materials of several lithologies, susceptible of being used as granular subbase and base. This communication describes the results obtained until now, only for one of the types of studied material, the limestone. Essentially, the paper gives the geotechnical characterization of the material and makes it possible to evaluate which is the range of variation of the resilient modulus obtained in cyclic tri-axial tests. Finally, is displayed the summary of the work that is still expected to be develop.

1- INTRODUÇÃO

Nesta comunicação analisa-se o comportamento de um material de granulometria extensa, de origem calcária, utilizado em sub-base granular não tratada de pavimentos rodoviários.

Fez-se a sua caracterização geotécnica através de ensaios como o azul de metileno e o micro-Deval bem como a caracterização do seu comportamento mecânico recorrendo a ensaios triaxiais cíclicos, realizados segundo a norma AASHTO TP 46 - 94 [1]. O objectivo é, no âmbito de uma tese de doutoramento, contribuir para a modelação do comportamento deste tipo de materiais quando colocados em camadas de pavimentos rodoviários.

2- MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizadas cinco amostras de calcário britado, com características de sub-base, tendo sido quatro recolhidas numa obra em construção à data de início do trabalho: Auto-estrada A23, troço Castelo Branco Sul - Fratel. A quinta amostra foi recolhida directamente na pedreira “Barrocal nº 2”, em Pombal, a qual forneceu a obra. Na figura 1 apresenta-se uma fotografia do material recolhido na Pedreira referida.



Figura 1- Amostra C5, recolhida na pedreira “Barrocal nº 2”

3- CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

3.1- Caracterização geotécnica

Sobre as amostras recolhidas, quer na obra quer na pedreira, procedeu-se à realização de um conjunto de ensaios de laboratório com vista à avaliação das suas características do ponto de vista de distribuição granulométrica, resistência ao desgaste, capacidade resistente e limpeza.

Para tal realizaram-se ensaios [2] como o *Los Angeles* [3] e o micro-Deval [4], o equivalente de areia [5] e o azul de metileno [6] ou o *california bearing ratio* (CBR) [7].

Devido às características granulométricas do material, não foi possível fazer compactação Proctor [8]. A compactação foi realizada por vibro-compressão, segundo a norma BS 1377: parte 4 [9], preparando provetes com espessura a variar entre 127 mm e 133 mm, realizando a compactação em 3 camadas durante 60 segundos cada.

O equipamento utilizado foi um martelo vibro-compressor que tem as seguintes características:

Frequência de percussão: 2750 impactos por minuto
Potência absorvida: 750 W
Diâmetro da placa de base: 147 mm

Os valores médios dos resultados dos ensaios realizados são os apresentados nos quadros 1 e 2.

3.2- Caracterização do comportamento mecânico

A caracterização do comportamento mecânico foi feita através da realização de ensaios triaxiais cíclicos segundo a norma AASHTO TP 46 - 94 [1].

Quadro 1- Resultados da análise granulométrica [10]

Peneiro		Valor médio da percentagem de passados (%)
nº	Abertura (mm)	
2"	50,80	100,0
1" 1/2	38,10	99,8
1"	25,40	96,6
3/4"	19,10	90,4
1/2"	12,70	78,8
3/8"	9,520	69,9
nº4	4,760	49,8
nº10	2,000	28,5
nº20	0,840	16,1
nº40	0,420	10,5
nº80	0,177	6,9
nº200	0,074	5,0

Quadro 2- Resultados dos ensaios de caracterização

Parâmetro	unidade	Valor médio
Teor em água ótimo	%	3,6
Baridade seca máxima	g/cm ³	2,29
CBR	%	99
Expansibilidade	%	0
Los Angeles	%	33
Micro-Deval húmido		14
Equivalente de areia	%	70
Azul de Metileno (0/0,075 mm)	g/100g	0,88
Azul de Metileno (0/38,1 mm)	g/100g	0,05

Segundo aquela norma, o tipo de material em estudo, agregado britado de granulometria extensa a utilizar em sub-base, tendo dimensão máxima de 37,5 mm, é classificado como material do tipo 1. Assim, os ensaios são realizados sobre provetes com diâmetro de 150 mm e altura de 2 vezes aquele, ou seja, 300 mm.

Os provetes foram compactados por vibro-compressão, em 6 camadas com espessura aproximada de 50 mm, em molde bipartido, tendo a compactação tido a duração necessária para se obter essa espessura de forma a atingir a baridade seca pretendida. O equipamento utilizado na compactação foi o martelo vibro-compressor descrito na secção anterior e que cumpre as especificações necessárias exigidas na norma usada como referência.

Segundo a norma AASHTO TP 46 - 94 [1], as condições de teor em água e baridade seca a utilizar em cada provete podem ser os valores obtidos na compactação em laboratório, 95% da baridade seca máxima e teor em água ótimo, ou os valores obtidos no controlo *in situ*, devendo ser utilizados estes valores sempre que sejam conhecidos. Nos ensaios realizados até ao momento, foram utilizados a baridade e teor em água obtidos em laboratório, ou seja, tal como referido, 95% da baridade seca máxima e teor em água ótimo, cujos valores médios obtidos foram, respectivamente, 2,18 g/cm³ e 3,6 %.

O ensaio consiste na aplicação de 16 sequências de carga ao provete, nas quais variam quer a tensão de confinamento quer a tensão deviatória. O número de ciclos aplicado é de 1000 para a 1ª sequência, correspondente ao condicionamento do provete, e de 100 nas 15 restantes. As condições de carregamento são as apresentadas no quadro 3.

Quadro 3- Condições de carregamento dos ensaios triaxiais cíclicos

Sequência	Materiais a utilizar em sub-base ou base				n° de ciclos
	σ_3 (kPa)	σ_{max} (kPa)	$\sigma_{ciclica}$ (kPa)	$\sigma_{contacto}$ (kPa)	
0	103,4	103,4	93,1	10,3	1000
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100
4	34,5	34,5	31,0	3,5	100
5	34,5	68,9	62,0	6,9	100
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100
7	68,9	68,9	62,0	6,9	100
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100
10	103,4	68,9	62,0	6,9	100
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100

σ_3 tensão de confinamento
 σ_{max} tensão axial máxima
 $\sigma_{ciclica}$ tensão axial cíclica ou resiliente
 $\sigma_{contacto}$ tensão de contacto

Cada ciclo tem uma frequência de 10 Hz, correspondendo a fase de carga a 0,1 seg e a fase de repouso a 0,9 seg, como indicado na Figura 2.

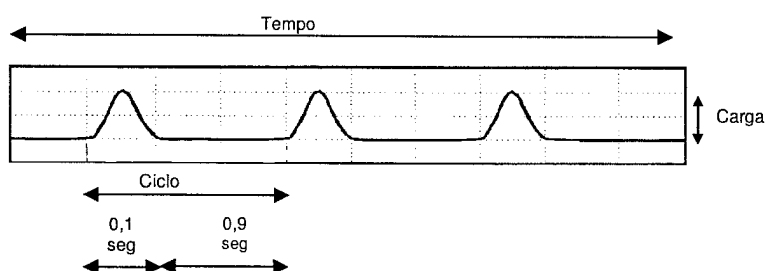


Figura 2- Carregamento função do tempo (adap. Protocol P46, LTPP, FHWA [11])

No que diz respeito à deformação, ela divide-se em duas partes, deformação recuperável ou resiliente e deformação não recuperável ou permanente, como se indica na Figura 3.

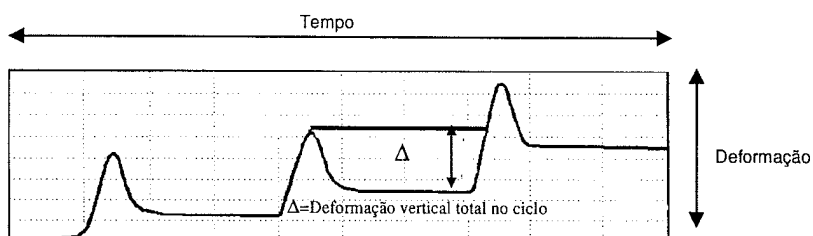


Figura 3- Deformação função do tipo (adap. Protocol P46, LTPP, FHWA [11])

Do ensaio obtém-se o Módulo Resiliente, do modo apresentado na equação (1), correspondente a cada uma das 16 sequências, sendo aquele valor a média do módulo resiliente encontrado para os 5 últimos ciclos das mesmas.

$$M_r = \frac{C_{cíclica}}{\mathcal{E}_r} = \frac{C_1 - C_3}{\mathcal{E}_r} \text{ MPa} \quad (1)$$

onde: $\sigma_{cíclica}$ = tensão axial cíclica ($\sigma_{máx} - \sigma_{contacto}$)
 $\sigma_1 - \sigma_3$ = tensão deviatória
 \mathcal{E}_r = deformação axial resiliente (recuperada)

O equipamento existente no Laboratório de Mecânica de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, com o qual se estão a realizar os ensaios no âmbito deste trabalho e que se apresenta na figura 4 a), é composto por uma prensa Wykheam Farrance de 100 kN, câmara triaxial para provetes de 160 mm x 300 mm, sistema de aquisição de dados com 8 canais, célula de carga de 25 kN e compressor.

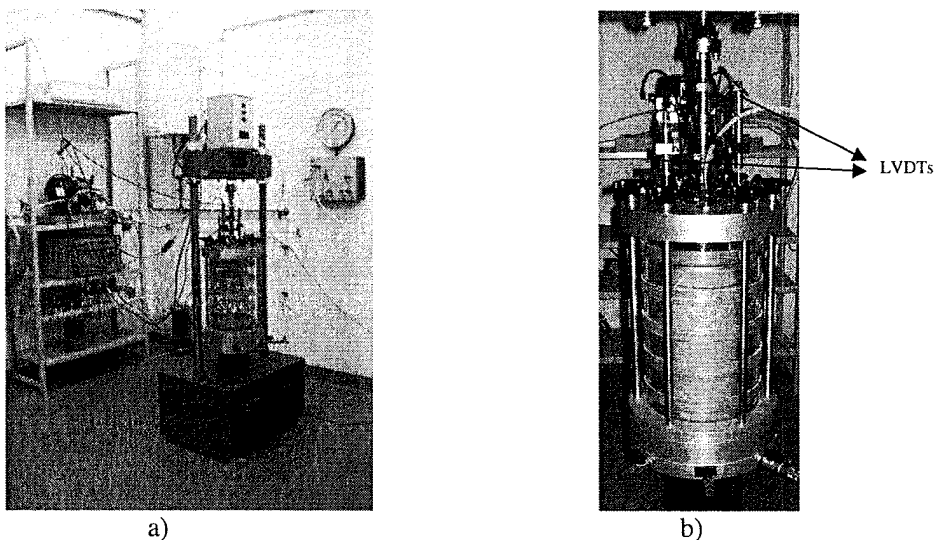


Figura 4- a) Equipamento existente no Laboratório de Mecânica de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, b) Localização dos LVDTs para medição dos deslocamentos verticais.

Durante o ensaio são medidos e registados os deslocamentos verticais em dois pontos, através de dois LVDTs colocados no exterior da câmara, bem como todas as tensões aplicadas ao provete, como se pode verificar na figura 4b).

Nos ensaios realizados até ao momento, foram utilizadas as condições de teor em água e baridade seca já explicitadas e as de carregamento apresentadas no quadro 3, tendo a compactação dos provetes sido realizada com o martelo vibro-compressor também já descrito.

No quadro 4 apresentam-se, para os 10 provetes ensaiados até ao momento, os valores médios do módulo resiliente obtidos para cada uma das 16 sequências de ensaio para as condições indicadas.

Quadro 4- Valores médios de módulo resiliente

Sequência	Materiais a utilizar em sub-base ou base				nº de ciclos	Módulo resiliente (MPa)
	σ_3 (kPa)	σ_{max} (kPa)	$\sigma_{cíclica}$ (kPa)	$\sigma_{contacto}$ (kPa)		
0	103,4	103,4	93,1	10,3	1000	394
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100	163
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100	201
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100	214
4	34,5	34,5	31,0	3,5	100	207
5	34,5	68,9	62,0	6,9	100	240
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100	259
7	68,9	68,9	62,0	6,9	100	293
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100	331
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100	352
10	103,4	68,9	62,0	6,9	100	318
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100	341
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100	392
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100	376
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100	394
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100	453

σ_3 tensão de confinamento

σ_{max} Tensão axial máxima

$\sigma_{cíclica}$ Tensão axial cíclica ou resiliente

$\sigma_{contacto}$ tensão de contacto

O módulo resiliente apresenta uma variação esperada sendo, geralmente, maior para tensões de confinamento maiores e apresentando uma evolução positiva para tensões deviatórias (σ_{max}) crescentes, no que respeita à gama usada no ensaio.

No que diz respeito à deformação permanente, em qualquer dos ensaios realizados obtiveram-se valores da ordem dos 0,1% a 0,2%, muito abaixo dos 5% referidos na norma AASHTO TP 46 - 94 [1]. Pelo que se procedeu ao ensaio de corte até ao limite de capacidade do equipamento, tendo-se atingido valores máximos de deformação permanente de cerca de 4,9%.

Na figura 5 apresenta-se um provete após compactação, após colocação da membrana de borracha, durante o ensaio e após a realização do ensaio.

4- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO COM O DE OUTROS MATERIAIS DE ORIGEM CALCÁRIA

Dado que se está ainda numa fase do trabalho em que o volume de resultados de ensaios triaxiais cíclicos é relativamente pequeno e apenas de um tipo de material, vão comparar-se esses resultados com os de outros materiais, da mesma litologia, utilizados na Via Longitudinal do Algarve (VLA) como material de fundação ([12], [13]) e na A6 como sub-base ([13], [14]), respectivamente.

Os ensaios, nestes casos, foram realizados sobre provetes com cerca de 300 mm de diâmetro e 600 mm de altura e compactados por vibração.

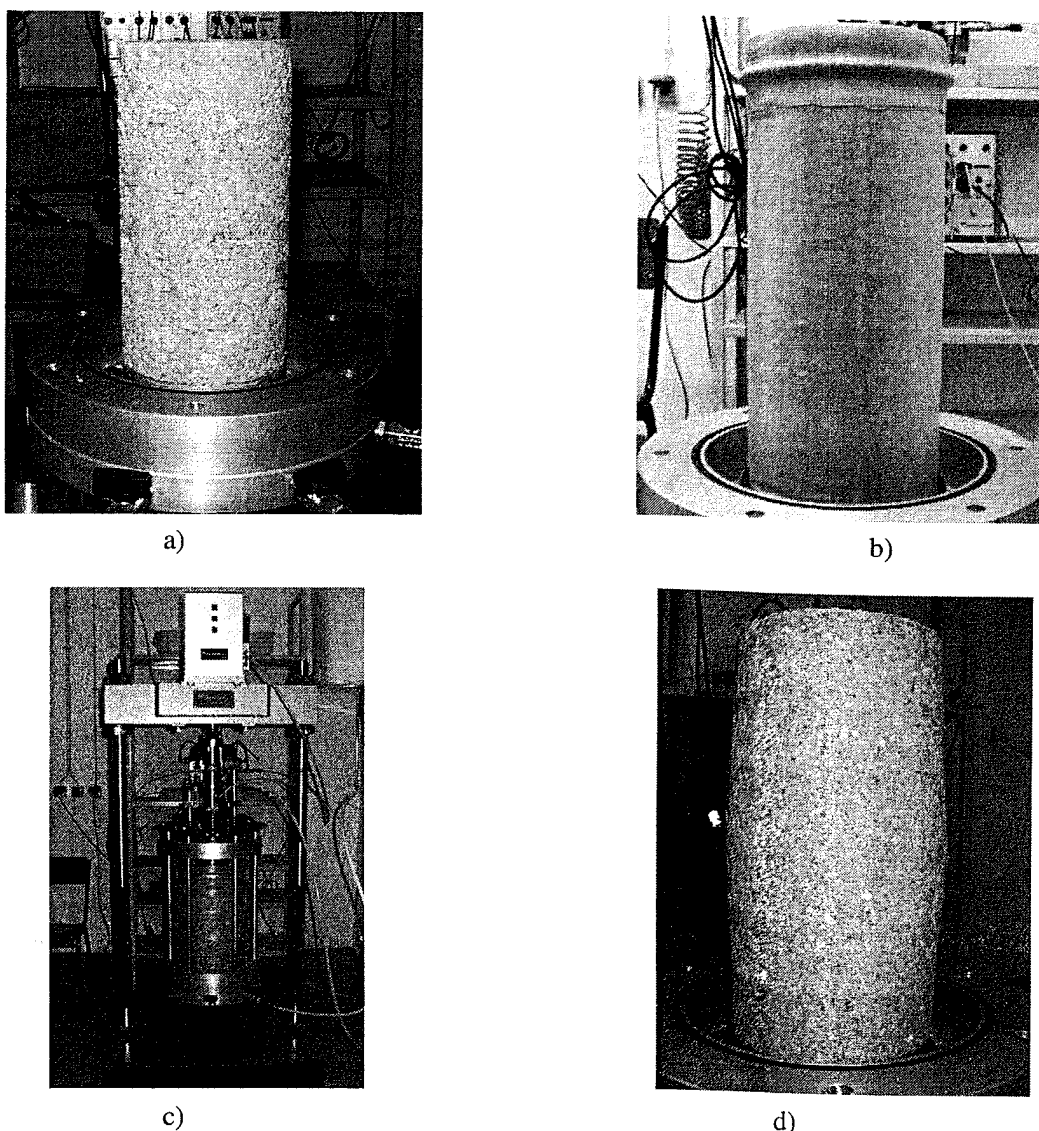


Figura 5- a) Provete de calcário compactado e colocado na prensa, b) Provete pronto a ser ensaiado, c) Provete a ser ensaiado, d) Provete após o ensaio

No quadro 5 apresentam-se as condições de compactação dos cinco provetes a que se irá fazer referência, dois relativos ao material da VLA e três relativos ao material da A6, bem como o tipo de camada em que foram utilizados.

Quadro 5- Condições de compactação e camada em que foram utilizados os materiais da VLA e da A6 ([12], [13], [14])

Obra	Material	Camada em que foi utilizado	Provete	$\gamma_d^{máx}$ (g/cm^3)	w (%)
VLA	Calcário	Fundação	CT1	2,10	5,2
			CT2		4,6
A 6	Calcário da "Catbritas"	Sub-base	1C	2,25	4,2
			2C		2,2
			3C		4,2

No quadro 6 apresentam-se os resultados obtidos para cada provete da A6 e da VLA e os valores médios destes resultados, e ainda os resultados obtidos para o agregado da A23.

Quadro 6- Valores de módulo resiliente obtidos para os materiais da VLA e da A6 ([12], [13], [14])

Obra	Seq. [1]	σ_3 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	n° ciclos	M_r (MPa)					
					1C	2C	3C	CT1	CT2	Média
A23	4	34,5	34,5	100	-	-	-	-	-	207
	5		68,9		-	-	-	-	-	240
	6		103,4		-	-	-	-	-	259
	7	68,9	68,9		-	-	-	-	-	293
	8		137,9		-	-	-	-	-	331
	9		206,8		-	-	-	-	-	352
	10	103,4	68,9		-	-	-	-	-	318
	11		103,4		-	-	-	-	-	341
	12		206,8		-	-	-	-	-	392
A6	-	35	35	150	269	283	308	-	-	287
	-		70		297	296	336	-	-	310
	-		105		329	327	379	-	-	345
	-	70	50		337	346	406	-	-	363
	-		100		368	375	442	-	-	395
	-		150		415	406	485	-	-	435
	-	105	70		438	436	506	-	-	460
	-		140		477	464	565	-	-	502
	-		210		524	526	622	-	-	557
VLA	-	50	150	-	-	-	582	638	610	
	-	75	220	-	-	-	613	-	613	

As condições de ensaio para os três materiais referidos, no que diz respeito ao sistema de carga, ao número de ciclos e ainda às dimensões do provete, embora sendo diferentes, permitem extrair algumas conclusões.

Assim, analisando os resultados apresentados verifica-se que os provetes das três obras foram compactados para pesos específicos secos próximos sendo, no entanto, os teores em água mais baixos no material da A23, com excepção para um provete da A6.

No que diz respeito aos valores dos módulos resilientes, verifica-se que os valores obtidos para a A23 são os mais baixos, diferindo mesmo significativamente dos valores obtidos na VLA, sendo estes aproximadamente o dobro dos encontrados para a A23. Fazendo uma análise mais quantificada no que respeita à comparação entre a A6 e a A23, a diferença manifestada entre os resultados obtidos é em média de 102 MPa, com um desvio padrão de 41 MPa, o que significa uma diferença de 25% (com um desvio padrão de 10%) em relação ao valor médio do módulo reversível obtido para a A6. Pode verificar-se ainda que apesar das diferenças detectadas a tendência de evolução dos módulos é a mesma em qualquer dos casos, ou seja, o módulo é mais elevado para tensões de confinamento mais elevadas e cresce com o aumento da tensão deviatória, no que respeita à gama usada no ensaio.

Os resultados obtidos poderão, eventualmente, dever-se a uma granulometria na A23 com menos finos, o que se traduz por uma consistência intrínseca menor e, portanto, a uma menor resistência a uma aplicação cíclica de carga de frequência elevada. De qualquer modo é preciso confirmar estas tendências com a evolução dos trabalhos ainda a realizar, de forma a poder obter orientações seguras sobre quais as propriedades e de que valor, que deverão ser usadas na

modelação do comportamento dos pavimentos já executados. No entanto, não pode deixar-se de sublinhar desde já que as diferenças de comportamento encontradas para materiais do mesmo tipo, embora para condições de carregamento diferentes, podem conduzir a percepções de resistência completamente diferentes, o que naturalmente tem de ser explicado e resolvido para que possa haver uma indicação de valores coerentes para aplicação prática.

5- CONSIDERAÇÕES E TRABALHO FUTURO

Analisando os resultados dos ensaios até agora realizados sobre o material de origem calcária, pode concluir-se que o mesmo é não plástico e, segundo o Guia Técnico para a Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992 [15]) pode mesmo considerar-se que os finos são insensíveis à água, dados os valores de adsorção de azul de metileno obtidos. Conclui-se, por outro lado, ser um material com boa capacidade resistente, valores de CBR médios da ordem dos 100% bem como boa resistência ao desgaste, levando em linha de conta os resultados dos ensaios de *Los Angeles* e de micro-Deval.

No que diz respeito ao comportamento mecânico verificam-se, para valores de teor em água ótimo e 95% da baridade seca máxima, valores de módulo resiliente variáveis entre, aproximadamente, 200 MPa e 400 MPa, função das condições de carregamento, sendo de entre os três materiais referidos na secção 4 o que apresenta valores mais baixos.

Verifica-se, por outro lado, e no que respeita à deformação permanente obtida para as condições de ensaio usadas, que esta é, de um modo geral, muito pouco significativa no decorrer do ensaio.

Para além do material aqui tratado, calcário, de origem sedimentar, está a proceder-se à caracterização de outro tipo de material, um granito, que sendo de natureza geológica diferente, apresentará, certamente, algumas diferenças nas suas características, nomeadamente no que diz respeito ao desgaste e à resistência.

Na posse da caracterização mecânica dos dois materiais, nomeadamente do módulo resiliente e da evolução da deformação permanente, irá tentar proceder-se à modelação do seu comportamento mecânico em camadas granulares não tratadas de pavimentos rodoviários, recorrendo também ao estudo e interpretação da variação do seu estado de tensão obtida nos ensaios triaxiais cíclicos. Para tal pensa recorrer-se a modelos de interpretação correntes (Paute, Dawson e Galjaard, 1996 [16], COST 337, 2000 [17], Gomes Correia, 2003 [18]) de forma a tentar explicar os valores definidores do comportamento em ensaios não destrutivos realizados com recurso ao *falling weight deflectometer*.

Espera-se, ainda, que o estudo contribua para o estabelecimento de metodologias para a previsão do comportamento de pavimentos rodoviários, nas quais o efeito dos materiais referidos no comportamento estrutural dos pavimentos seja incluído de forma mais realista, nomeadamente no que respeita às condições portuguesas.

6- AGRADECIMENTOS

A investigação que deu origem a esta comunicação está a ser desenvolvida com o apoio do Programa para o Desenvolvimento Educativo em Portugal (PRODEP III), Medida 5 - Acção 5.3 - Formação Avançada de Docentes do Ensino Superior, através da bolsa atribuída à autora, o qual desde já se agradece.

Gostaria ainda de agradecer-se à SCUTVIAS Auto-estradas da Beira Interior pela disponibilidade para colaborar no desenvolvimento deste trabalho, através da disponibilização de dados relativos ao troço Castelo Branco Sul - Fratel, da Auto-estrada A 23.

7- REFERÊNCIAS

- [1] AASHTO TP 46 (1994). *Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*.
- [2] Pereira, P.; Picado-Santos, L. (2002). *Pavimentos Rodoviários*. Braga, Edição de autor.
- [3] LNEC E 237 1970. Ensaio de Desgaste pela Máquina de Los Angeles. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [4] NP EN 1097-1 (2002). *Ensaio das propriedades mecânicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval)*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa
- [5] LNEC E 199 (1967). *Solos. Ensaio de Equivalente de Areia*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [6] NF P 18-592 1990. *Granulats. Essai au Bleu de Méthylène. Méthode à la Tache*. AFNOR, Paris
- [7] LNEC E 198 (1967): *Solos. Determinação do CBR*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [8] LNEC E 197 (1966). *Solos. Ensaio de Compactação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [9] BS 1377: part 4 (1990). *Soils for civil engineering purposes. Part 4. Compaction-related tests*. British standard institution
- [10] LNEC E 233 (1969). *Agregados. Análise Granulométrica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [11] FHWA (1996). *LTPP materials characterization: Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils. Protocol P46*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [12] Freire, A. C. (1994). *Estudos relativos a camadas de pavimentos constituídas por materiais granulares*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.
- [13] Luzia, R. 1998. *Fundação de pavimentos rodoviários. Estudo da utilização de materiais xisto-grauváquicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [14] Hadjadjji, T.; Quaresma, L. (1998). *Estudo do comportamento mecânico de camadas granulares do pavimento da Auto-estrada nº6, sub-lanço Évora - Estremoz*. Relatório 164/98, NPR, LNEC, Lisboa.
- [15] LCPC/SETRA (1992). *Réalisation des Remblais et des Couches de Forme. Guide Technique*. LCPC/SETRA, Paris.
- [16] Paute, J., Dawson A.R. e Galjaard, P. J. (1996). *Recommendations for repeated load triaxial test equipment and procedure for unbound granular materials*. Flexible Pavements, Gomes Correia (ed), Balkema, Rotterdam.
- [17] COST 337 (2000). *Unbound granular materials for road pavements*. Transport research. Final report of the action. European Commission, Luxembourg
- [18] Gomes Correia, A. (2003). *Unbound granular materials in pavement and railway layers. Laboratory characterization and modelling*. Seminário sobre agregados, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa