

# **ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE AGREGADOS BRITADOS**

ROSA LUZIA

*PROFESSOR-ADJUNTO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA EST DO INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO*

LUÍS PICADO-SANTOS

*PROFESSOR AUXILIAR COM AGREGAÇÃO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA FCT DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA*

## **RESUMO**

O comportamento dos materiais britados de granulometria extensa em camadas de pavimentos rodoviários, apesar de alguns estudos já realizados nesse sentido, deve ser melhor estabelecido já que disso depende em boa medida a capacidade de previsão do comportamento em serviço daqueles pavimentos. Para contribuir para o melhor conhecimento desse comportamento está a desenvolver-se um trabalho cujo principal objectivo 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 para dois tipos de material: calcário e granito. Apresentam-se os valores do módulo resiliente obtido em ensaios triaxiais cíclicos, bem como uma primeira tentativa de modelação do comportamento mecânico dos dois tipos de material dos quais também se fornece a caracterização geotécnica.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nesta comunicação analisa-se o comportamento de dois tipos de material de granulometria extensa de origem calcária e granítica, respectivamente, utilizados 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 oito amostras de material britado, cinco de calcário e três de granito, com características de sub-base. Quatro das amostras de calcário foram recolhidas numa obra em construção à data de início do trabalho: Auto-estrada A23, troço Castelo Branco Sul - Fratel, tendo a quinta sido recolhida directamente na pedreira “Barrocal nº 2”, em Pombal, a qual forneceu a obra. As amostras de granito foram recolhidas em dois locais distintos, sendo que uma delas foi recolhida no depósito de uma obra na zona de Braga e as duas restantes numa pedreira na zona Celorico da Beira. Qualquer dos materiais graníticos foi utilizado em sub-base de obras em construção, as quais não irão ser identificadas, de acordo com o compromisso de reserva assumido com o promotor.

## **3- CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO**

### **3.1- Caracterização geotécnica**

Sobre as amostras recolhidas, 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], tendo a mesma sido realizada por vibro-compressão, segundo a norma BS 1377: parte 4 [9], preparando provetes com diâmetro de 150 mm e altura 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 com 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].

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.

**Quadro 1- Resultados da análise granulométrica [10]**

Peneiro		Valor médio da percentagem de passados	
n°	Abertura	Calcário	Granito
	(mm)	(%)	
2"	50,80	100,0	100,0
1" 1/2	38,10	99,8	99,6
1"	25,40	96,6	89,9
3/4"	19,10	90,4	80,8
1/2"	12,70	78,8	68,3
3/8"	9,520	69,9	61,0
n°4	4,760	49,8	46,3
n°10	2,000	28,5	34,4
n°20	0,840	16,1	24,5
n°40	0,420	10,5	17,2
n°80	0,177	6,9	10,2
n°200	0,074	5,0	5,8

**Quadro 2- Resultados dos ensaios de caracterização**

Parâmetro	unidade	Valor médio	
		Calcário	Granito
Teor em água ótimo	%	3,6	3,5
Baridade seca máxima	g/cm <sup>3</sup>	2,29	2,17
CBR	%	99	84
Expansibilidade	%	0	0
Los Angeles	%	33	37
Micro-Deval húmido	%	14	21
Micro-Deval seco	%	6	7
Equivalente de areia	%	70	61
Azul de Metileno (0/0,075 mm)	g/100g	0,88	1,55
Azul de Metileno (0/38,1 mm)	g/100g	0,05	0,08

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, teor em água ótimo e 95% da baridade seca máxima, ou os valores obtidos no controlo *in situ*, devendo ser utilizados estes valores sempre que sejam conhecidos. Assim, realizaram-se 2 ensaios sobre cada uma das oito amostras para os dois tipos de condições de compactação referidas. No quadro 3 apresentam-se os valores médios de baridade seca e teor em água utilizados nos dois tipos de material.

**Quadro 3- Valores médios de teor em água e baridade seca nos ensaios triaxiais**

Material	Valores médios			
	Condições de Laboratório		Condições <i>in situ</i>	
	Teor em água (%)	Baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )	Teor em água (%)	Baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )
Calcário	3,6	2,17	3,5	2,27
Granito	4,25	2,17	4,2	2,21

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 4.

**Quadro 4- Condições de carregamento dos ensaios triaxiais cíclicos**

Sequência	Materiais a utilizar em sub-base ou base				nº de ciclos
	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_{max}$ (kPa)	$\sigma_{cíclica}$ (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

$\sigma_3$  tensão de confinamento;  $\sigma_{max}$  tensão axial máxima;  $\sigma_{cíclica}$  tensão axial cíclica ou resiliente;  
 $\sigma_{contacto}$  tensão de contacto

O carregamento é do tipo sinusoidal com repouso, correspondendo a fase de carga a 0,1 seg e a fase de repouso a 0,9 seg.

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.

$$M_r = \frac{S_{cíclica}}{e_r} = \frac{S_1 - S_3}{e_r} \text{ MPa} \quad (1)$$

onde:  $\sigma_{cíclica}$  = tensão axial cíclica ( $\sigma_{max} - \sigma_{contacto}$ );  $\sigma_1 - \sigma_3$  = tensão deviatória  
 $e_r$  = deformação axial resiliente (recuperada)

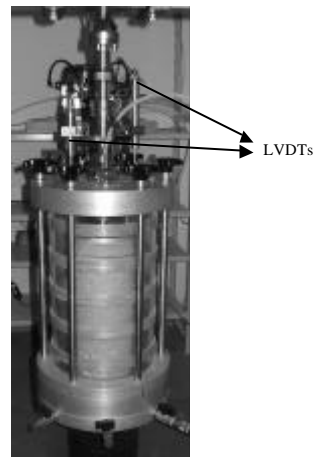
O equipamento existente no Laboratório de Mecânica de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, com o qual foram realizados os ensaios no

âmbito deste trabalho e que se apresenta na figura 1 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.

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 1b).



a)



b)

Figura 1- 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.

Nos ensaios realizados foram utilizadas as condições de teor em água e baridade seca apresentados no quadro 3 e as de carregamento apresentadas no quadro 4, tendo a compactação dos provetes sido realizada com o martelo vibro-compressor também já descrito.

No quadro 5 apresentam-se os valores médios do módulo resiliente obtidos para cada uma das 16 sequências de ensaio para as condições indicadas.

Tendo em conta o comportamento não linear dos materiais granulares, ou seja a influência do estado de tensão no seu comportamento mecânico, tentou modelar-se esse mesmo comportamento recorrendo a diferentes modelos e verificar quais os que melhor traduziam o comportamento deste tipo de materiais portugueses.

Foram, até ao momento, utilizados cinco modelos de comportamento, equações (2) a (6), baseados no módulo resiliente e no coeficiente de Poisson, os quais foram sendo desenvolvidos por diferentes autores, como indicado por Lekarp [12].

$$M_r = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2)$$

$$Mr = k_3 \theta^{k_4} \quad (3)$$

$$Mr = k_5 \sigma_d^{k_6} \quad (4)$$

$$Mr = k_7 \theta^{k_8} q^{k_9} \quad (5)$$

$$Mr = k_{10} q^{k_{11}} \sigma_3^{k_{12}} \quad (6)$$

onde:  $M_r$  - módulo reversível;  $\sigma_3$  - tensão de confinamento;

$\theta$  - primeiro invariante do tensor das tensões ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ )

$\sigma_d = q = \sigma_1 - \sigma_3$  - tensão deviatória;  $k_1$  a  $k_{12}$  - constantes

**Quadro 5- Valores médios de módulo resiliente**

Seq.	Materiais a utilizar em sub-base ou base				n° de ciclos	Módulo resiliente			
	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_{max}$ (kPa)	$\sigma_{cíclica}$ (kPa)	$\sigma_{contacto}$ (kPa)		Calcário		Granito	
						C. Lab.	C. <i>in situ</i>	C. Lab.	C. <i>in situ</i>
						(MPa)			
0	103,4	103,4	93,1	10,3	1000	394	441	239	219
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100	163	164	88	80
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100	201	196	102	91
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100	214	222	112	102
4	34,5	34,5	31,0	3,5	100	207	221	116	103
5	34,5	68,9	62,0	6,9	100	240	273	136	122
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100	259	301	153	138
7	68,9	68,9	62,0	6,9	100	293	339	187	164
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100	331	414	212	194
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100	352	450	228	212
10	103,4	68,9	62,0	6,9	100	318	381	217	186
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100	341	425	231	210
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100	392	514	269	245
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100	376	479	265	236
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100	394	498	284	250
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100	453	612	317	294

$\sigma_3$  tensão de confinamento;  $\sigma_{max}$  Tensão axial máxima;  $\sigma_{cíclica}$  Tensão axial cíclica ou resiliente;  $\sigma_{contacto}$  tensão de contacto  
C. Lab. Condições de compactação em laboratório; C. *in situ* Condições de compactação *in situ*

Os modelos e respectivos coeficientes de determinação encontrados para os materiais em estudo são os apresentados no quadro 6.

Da análise dos resultados conclui-se que os granitos apresentam valores de módulo resiliente mais baixos, qualquer que seja o estado de tensão considerado. No entanto, para qualquer dos materiais o módulo apresenta uma variação esperada, sendo, geralmente, maior para tensões de confinamento maiores e apresentando uma evolução positiva para tensões deviatórias ( $\sigma_{cíclica}$ ) crescentes, no que respeita à gama usada no ensaio.

Analisando os modelos de comportamento, verifica-se que para o modelo correspondente à equação (4) os valores de  $r^2$  obtidos são os mais baixos dos 5 modelos até agora analisados. Verifica-se, por outro lado, que as melhores correlações, valores de  $r^2$  mais elevados, ocorrem quando se faz depender  $M_r$  de  $\theta$  e  $q$  ou de  $q$  e  $\sigma_3$ , ou seja, para os modelos correspondentes às equações (5) e (6).

**Quadro 6- Modelos de comportamento encontrados para os materiais em estudo**

Cond. Lab.	r <sup>2</sup>	Cond. <i>in situ</i>	r <sup>2</sup>
Calcário			
$Mr = 880,91\sigma_3^{0,3916}$	0,8914	$Mr = 1488,00\sigma_3^{0,5195}$	0,8898
$Mr = 522,13\theta^{0,4388}$	0,8914	$Mr = 744,47\theta^{0,5832}$	0,9857
$Mr = 771,22\sigma_d^{0,3854}$	0,8347	$Mr = 1256,10\sigma_d^{0,5140}$	0,8423
$Mr = 583,98\theta^{0,3672}q^{0,0821}$	0,9963	$Mr = 883,67\theta^{0,4647}q^{0,1301}$	0,9981
$Mr = 973,52q^{0,1930}\sigma_3^{0,2543}$	0,9973	$Mr = 1681,55q^{0,2696}\sigma_3^{0,3215}$	0,9988
Granito			
$Mr = 863,241\sigma_3^{0,5521}$	0,9401	$Mr = 770,65\sigma_3^{0,5495}$	0,9213
$Mr = 406,38\theta^{0,6067}$	0,9981	$Mr = 366,57\theta^{0,6088}$	0,9945
$Mr = 654,05\sigma_d^{0,5078}$	0,7691	$Mr = 607,53\sigma_d^{0,5204}$	0,7995
$Mr = 417,43\theta^{0,5902}q^{0,0193}$	0,9982	$Mr = 408,43\theta^{0,5482}q^{0,0753}$	0,9982
$Mr = 945,90q^{0,1954}\sigma_3^{0,4093}$	0,9986	$Mr = 872,65q^{0,2388}\sigma_3^{0,3798}$	0,9990

Pode ainda verificar-se que as correlações encontradas são, de um modo geral, de melhor qualidade para o granito do que para o calcário.

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].

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

De seguida vão comparar-se os resultados do comportamento mecânico obtidos para os dois materiais em estudo, com os de dois outros materiais de origem calcária, utilizados na Via Longitudinal do Algarve (VLA) como material de fundação ([13], [14]) e na A6 como sub-base ([14], [15]), 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.

No quadro 7 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. No quadro 8 apresentam-se os resultados obtidos para cada provete da A6 e da VLA e os valores médios destes resultados.

No que diz respeito a modelos de comportamento, aos materiais da VLA foram aplicados os dois modelos apresentados nas equações (2) e (3) e aos materiais da A6 apenas foi aplicado o modelo referido na equação (3). Os modelos encontrados são os apresentados no quadro 9.

**Quadro 7- 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	$\gamma_d^{m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

**Quadro 8- Valores de módulo resiliente obtidos para os materiais da VLA e da A6 ([13], [14], [15])**

Obra	Seq.	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	n <sup>o</sup> ciclos	M <sub>r</sub> (MPa)					
					1C	2C	3C	CT1	CT2	Valor Médio
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
	-		50		150	-	-	582	638	610
VLA	-	75	220	-	-	-	613	-	613	

**Quadro 9- Modelos encontrados para os módulos reversíveis dos materiais da VLA e da A6 ([13], [14], [15])**

Obra	Provete	M <sub>r</sub> = f( $\sigma_3$ )	r <sup>2</sup>	M <sub>r</sub> = f( $\theta$ )	r <sup>2</sup>
VLA	CT1	M <sub>r</sub> = 1259 $\sigma_3^{0,27}$	0,96	M <sub>r</sub> = 645 $\theta^{0,18}$	0,46
	CT2	M <sub>r</sub> = 1257 $\sigma_3^{0,25}$	0,84	M <sub>r</sub> = 1000 $\theta^{0,38}$	0,40
A 6	1C	-	-	M <sub>r</sub> = 11,519 $\theta^{0,6333}$	0,9762
	2C	-	-	M <sub>r</sub> = 14,862 $\theta^{0,5877}$	0,9583
	3C	-	-	M <sub>r</sub> = 11,321 $\theta^{0,6650}$	0,9731

Nas figuras 2 e 3 apresentam-se os módulos reversíveis e os modelos encontrados,  $M_r = f(\sigma_3)$  e  $M_r = f(\theta)$  apresentados nos quadros 6 e 9, para os materiais em estudo, calcário da A23 e granito, e para os materiais da VLA e da A6.

Para os quatro materiais referidos, as condições de ensaio, 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 dos quatro materiais 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, para condições de compactação de Laboratório, verifica-se que os obtidos para os materiais agora em estudo, quer calcários da A23 quer granito, são os mais baixos, diferindo mesmo significativamente dos valores obtidos



na VLA, sendo estes aproximadamente o dobro dos encontrados para a A23. Para as condições de compactação *in situ* verificam-se valores da mesma ordem de grandeza para os granitos mas mais elevados para o calcário da A23, apresentando valores entre 160 MPa e 600 MPa, valores próximos dos apresentados pelo calcário da VLA.

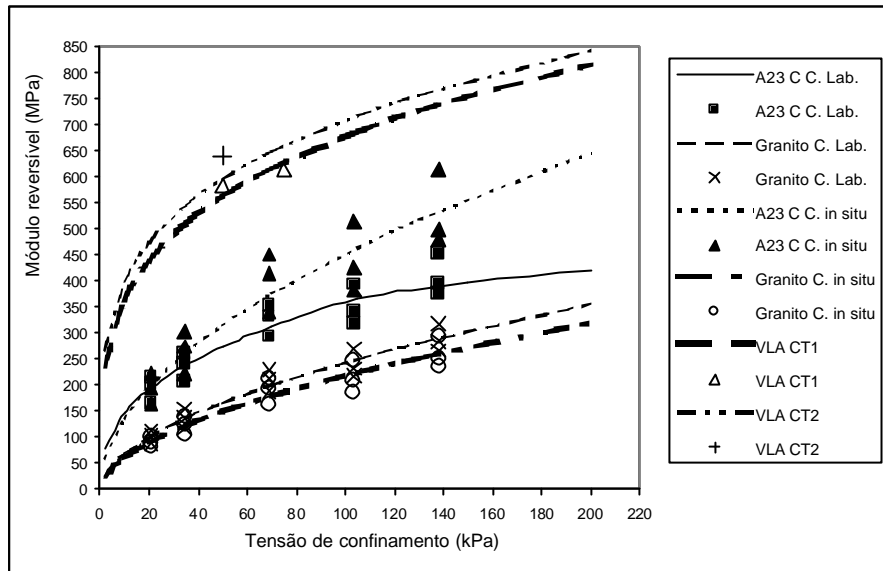


Figura 2- Módulos Reversíveis e modelos de comportamento ( $M_r = f(\sigma_3)$ ) dos materiais analisados no trabalho e da VLA

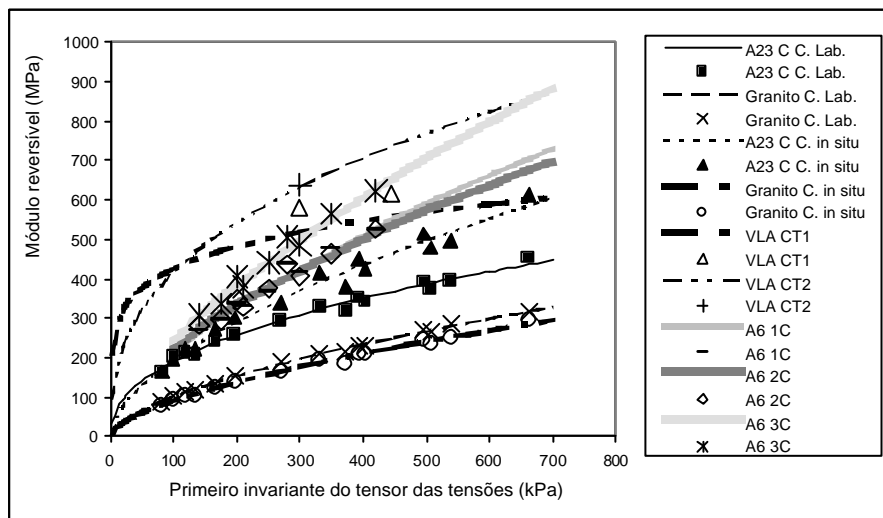


Figura 3- Módulos Reversíveis e modelos de comportamento ( $M_r = f(\theta)$ ) dos materiais analisados no trabalho, da VLA e da A 6

Relativamente à modelação do comportamento mecânico, para os dois modelos referidos no caso da VLA e um no caso da A6, verifica-se que quando se faz depender o módulo resiliente da tensão de confinamento o ajuste encontrado quer para os materiais da VLA quer para os

calcários e granitos agora em estudo não é muito bom, já que se tem  $r^2$  a variar de 0,8898, para o calcário da A23 para condições *in situ*, a 0,9600, para o provete CT1 da VLA.

Quando se faz depender o módulo resiliente do primeiro invariante do tensor das tensões ( $\theta$ ), verifica-se que o melhor ajuste se obtém para o granito agora em estudo, para qualquer das condições de compactação, com  $r^2$  a variar de 0,9945 a 0,9981, e que o pior ajuste se verifica para os materiais da VLA com  $r^2$  a variar entre 0,40 e 0,46. Os outros dois materiais analisados, calcários da A23 e da A6, apresentam  $r^2$  a variar entre 0,8914 e 0,9857.

## 5- CONCLUSÕES

Analisando os resultados dos ensaios realizados sobre os materiais de origem calcária e granítica, pode concluir-se que os mesmos são não plásticos e, segundo o Guia Técnico para a Construção de Aterros e Leito do Pavimento (LCPC/SETRA, 1992 [16]) 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, serem materiais com boa capacidade resistente, valores de CBR médios próximos dos 100 % para o calcário e 85 % para o granito, bem como boa resistência ao desgaste, levando em linha de conta os resultados dos ensaios de *Los Angeles* e de micro-Deval. Verifica-se, no entanto, que o calcário apresenta, de um modo geral, melhores características que o granito.

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, função das condições de carregamento, variáveis entre, aproximadamente, 160 MPa e 450 MPa, para o calcário e entre cerca de 100 e 300 MPa para os granitos. Para as condições de compactação *in situ* verificam-se valores da mesma ordem de grandeza para os granitos mas mais elevados para o calcário da A23, apresentando valores entre 160 MPa e 600 MPa. Deste modo, o calcário compactado para as condições *in situ*, pode atingir, função das condições de carga, valores próximos dos apresentados pelo calcário da VLA, que é o que apresenta valores de módulo reversível mais elevados de entre os quatro materiais analisados.

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.

Da modelação do comportamento mecânico até agora realizada, pode concluir-se que os modelos que melhor explicam o módulo resiliente são os correspondentes às equações (5) e (6), ou seja, quando se faz depender o módulo de  $\theta$  e  $q$  ou de  $q$  e  $\sigma_3$ , já que para aqueles modelos se obtiveram valores de  $r^2$  a variar de 0,9963 a 0,9990. Obtiveram-se também correlações de boa qualidade, embora com valores de  $r^2$  um pouco inferiores, fazendo a

modelação a partir do modelo correspondente à equação (3), ou seja quando se faz depender o módulo resiliente do primeiro invariante do tensor das tensões,  $\theta$ .

Quando comparada a modelação do comportamento mecânico com a de outros materiais, verifica-se que quando se faz depender o módulo resiliente da tensão de confinamento o ajuste encontrado quer para os materiais da VLA quer para os calcários e granitos agora em estudo não é muito bom, já que se tem  $r^2$  a variar de 0,8898, para o calcário da A23 para condições *in situ*, a 0,9600, para o provete CT1 da VLA.

Quando se faz depender o módulo resiliente do primeiro invariante do tensor das tensões ( $\theta$ ), verifica-se que o melhor ajuste se obtém para o granito agora em estudo, para qualquer das condições de compactação, com  $r^2$  a variar de 0,9945 a 0,9981 e que o pior ajuste se verifica para os materiais da VLA com  $r^2$  a variar entre 0,40 e 0,46. Os outros dois materiais analisados, calcários da A23 e da A6, apresentam  $r^2$  a variar entre 0,8914 e 0,9857.

No que diz respeito a trabalho futuro, está a tentar completar-se a modelação do comportamento mecânico recorrendo a outros modelos de interpretação ainda não analisados ([12], [17],[18]), por 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.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] AASHTO TP 46 - “*Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*”. 1994.

- [2] Pereira, P.; Picado-Santos, L. - “Pavimentos Rodoviários”. Edição de autor, Braga, 2002
- [3] LNEC E 237 - “Ensaio de Desgaste pela Máquina de Los Angeles”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1970.
- [4] NP EN 1097-1 - “Ensaio das propriedades mecânicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval)”. Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 2002.
- [5] LNEC E 199 - “Solos. Ensaio de Equivalente de Areia”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1967
- [6] NF P 18-592 - “*Granulats. Essai au Bleu de Méthylène. Méthode à la Tache*”. AFNOR, Paris, 1990.
- [7] LNEC E 198 - “Solos. Determinação do CBR”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1967.
- [8] LNEC E 197 - “Solos. Ensaio de Compactação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1966.
- [9] BS 1377: part 4 - “*Soils for civil engineering purposes. Part 4. Compaction-related tests*”. British standard institution, 1990.
- [10] LNEC E 233 - “Agregados. Análise Granulométrica”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1969.
- [11] FHWA - “*LTPP materials characterization: Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils. Protocol P46*”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1996
- [12] Lekar, F.; Isacsson, U.; Dawson, A. - “*State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates*”. Journal of Transportation Engineering, ASCE, January-February 2000, 66-75.
- [13] Freire, A. C. - “Estudos relativos a camadas de pavimentos constituídas por materiais granulares”. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 1994.
- [14] Luzia, R. - “Fundação de pavimentos rodoviários. Estudo da utilização de materiais xisto-grauváquicos”. Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra. Coimbra, 1998
- [15] Hadjadji, T.; Quaresma, L. - “Estudo do comportamento mecânico de camadas granulares do pavimento da Auto-estrada nº6, sub-lanço Évora - Estremoz”. Relatório 164/98, NPR, LNEC. Lisboa, 1998
- [16] LCPC/SETRA - “*Réalisation des Remblais et des Couches de Formé*”. Guide Technique. LCPC/SETRA. Paris, 1992.
- [17] COST 337 - “*Unbound granular materials for road pavements*”. Transport research. Final report of the action. European Commission. Luxembourg, 2000
- [18] Gomes Correia, A. - “*Unbound granular materials in pavement and railway layers. Laboratory characterization and modelling*”. Seminário sobre agregados, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2003.