

# **ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS NA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE AGREGADOS BRITADOS: METODOLOGIAS AASHTO E CEN**

Rosa Luzia

Departamento de Engenharia Civil da EST do Instituto Politécnico de Castelo Branco  
Castelo Branco, Portugal  
rluzia@est.ipcb.pt

Luís de Picado-Santos

Departamento de Engenharia Civil da FCT da Universidade de Coimbra  
Coimbra, Portugal  
picsan@dec.uc.pt

José M. Neves

Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico  
Lisboa, Portugal  
neves@civil.ist.utl.pt

## **Resumo**

Os agregados britados de granulometria extensa continuam a ser frequentemente utilizados nas camadas não ligadas de pavimentos rodoviários Portugueses, nomeadamente em sub-base e base granulares. O comportamento destes materiais naquele tipo de camadas, apesar de alguns estudos já realizados nesse sentido, não se encontra ainda suficientemente caracterizado, sobretudo por razões que se prendem com a heterogeneidade dos maciços donde são provenientes. Sendo estes materiais de especial importância para a tecnologia de pavimentos Portuguesa e por forma a tentar contribuir para um mais aprofundado conhecimento dos mesmos foram desenvolvidas duas teses de Doutoramento, na Universidade de Coimbra e no Instituto Superior Técnico, que, utilizando diferentes metodologias de ensaio, tiveram como principal objectivo a caracterização mecânica e a elaboração de modelos típicos de comportamento para materiais britados não tratados. Basicamente, em ambos os trabalhos procedeu-se, para além da caracterização geotécnica, à caracterização do comportamento mecânico do material em laboratório, recorrendo a ensaios triaxiais cíclicos, realizados segundo dois procedimentos distintos. Nesta comunicação apresentam-se os resultados encontrados, nomeadamente no que respeita à modelação dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, segundo as duas metodologias de ensaio, incluindo o modelo que, segundo os trabalhos, melhor traduz o comportamento mecânico daqueles materiais portugueses. Por fim, faz-se uma breve comparação entre as duas metodologias de ensaio e avalia-se a sua influência no módulo resiliente dos materiais.

## **INTRODUÇÃO**

Nesta comunicação analisa-se o comportamento de materiais britados de granulometria extensa, de origem calcária e granítica, utilizados em sub-base granular não tratada de pavimentos rodoviários em Portugal.

Fez-se a sua caracterização geotécnica bem como a caracterização do seu comportamento mecânico recorrendo a ensaios triaxiais cíclicos, realizados segundo as normas AASHTO TP

46 - 94 (AASHTO, 1994) e prENV 00227413 (CEN, 1995b), publicada actualmente como EN 13286-7 (CEN, 2004). O objectivo foi, no âmbito de duas teses de doutoramento, contribuir para a modelação do comportamento deste tipo de materiais quando colocados em camadas de pavimentos rodoviários,

## **MATERIAIS CARATERIZADOS**

Nos trabalhos desenvolvidos foi utilizado agregado britado de granulometria extensa de dois tipos litológicos, calcário e granito. Caracterizaram-se sete amostras de calcário, cinco provenientes de uma pedreira na zona de Pombal e duas provenientes de uma pedreira na zona de Alenquer, e três amostras de material granítico, sendo que duas foram recolhidas numa pedreira próximo de Celorico da Beira e uma na zona de Braga.

Qualquer dos materiais foi utilizado em camada de sub-base em obras em construção à altura de desenvolvimento dos trabalhos. O material calcário foi utilizado no troço Castelo Branco Sul - Fratel, da A23, na zona de Castelo Branco e no IC17, Circular Regional Interior de Lisboa (CRIL), e o material granítico foi utilizado em obras, que não irão ser identificadas, devido a compromissos assumidos com os respectivos promotores, construídas nas zonas onde as amostras foram recolhidas.

## **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA**

Sobre as amostras recolhidas foram realizados um conjunto de ensaios de laboratório com vista à avaliação das suas características geotécnicas, entre eles: compactação (BSI, 1990 e CEN, 1995a), *Los Angeles* (LNEC, 1970), *micro-Deval* (IPQ, 2002), equivalente de areia (LNEC, 1967b), azul de metileno (AFNOR, 1990) e *california bearing ratio* (CBR) (LNEC, 1967a).

Devido às características granulométricas do material, não foi possível fazer compactação *Proctor* (LNEC, 1966), tendo a mesma sido realizada por vibro-compressão, segundo a norma BS 1377: parte 4 (BSI, 1990), no caso dos calcários de Pombal e granitos, e segundo a prEN 00227411 (CEN, 1995a), no caso dos calcários de Alenquer.

Os provetes de calcário de Pombal e de granito, com diâmetro de 150 mm e altura a variar entre 127 mm e 133 mm, foram compactados em 3 camadas, durante 60 segundos cada. O equipamento utilizado foi um martelo vibro-compressor com as características: Frequência de percussão: 2750 impactos por minuto; Potência absorvida: 750 W; Diâmetro da placa de base: não inferior a 146 mm,

Os provetes de calcário de Alenquer foram compactados em 5 camadas, durante 60 segundos cada tendo o martelo vibrador utilizado as características: 2000 impactos por minuto; Potência absorvida: 1050 W; Diâmetro da placa de base: 100 mm e 155 mm (última camada).

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

**Quadro 1: Resultados da análise granulométrica**

Abertura (mm)	Passados (%)		
	Calcário Pombal	Calcário Alenquer	Granito
50,80	100	100	100
38,10	99,8	100	99,6
25,40	96,6	(*)	89,9
19,10	90,4	84,0	80,8
12,70	78,8	(*)	68,3
9,520	69,9	59,5	61,0
4,760	49,8	43,0	46,3
2,000	28,5	27,9	34,4
0,840	16,1	20,4	24,5
0,420	10,5	15,4	17,2
0,177	6,9	12,1	10,2
0,074	5,0	9,9	5,8

(\*) Peneiro não utilizado

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

Parâmetro	Unidade	Calcário Pombal	Calcário Alenquer	Granito
Teor em água ótimo	%	3,6	4,4	3,5
Baridade seca máxima	kg/m <sup>3</sup>	2290	2400	2170
CBR	%	99	(*)	84
Expansibilidade		0	(*)	0
<i>Los Angeles</i>		33	(*)	37
<i>Micro-Deval</i>		14	(*)	21
Equivalente de Areia		70	44	61
Azul de Metileno (0/0,075 mm)	g/100g	0,88	(*)	1,55
Azul de Metileno (0/38,1 mm)		0,05	(*)	0,07
Partículas < N <sup>o</sup> 4 (ASTM)				
Massa volúmica das partículas secas	kg/m <sup>3</sup>	(*)	2470	(*)
Massa volúmica do material impermeável		(*)	2690	(*)
Massa volúmica das partículas saturadas		(*)	2560	(*)
Absorção de água	%	(*)	3,28	(*)
Partículas > N <sup>o</sup> 4 (ASTM)				
Massa volúmica das partículas secas	kg/m <sup>3</sup>	(*)	2650	(*)
Massa volúmica do material impermeável		(*)	2710	(*)
Massa volúmica das partículas saturadas		(*)	2670	(*)
Absorção de água	%	(*)	0,79	(*)

(\*) Ensaio não realizado

## CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM LABORATÓRIO

### Metodologias de Ensaio

Na caracterização do comportamento mecânico dos materiais em laboratório foram realizados ensaios triaxiais cíclicos de acordo com a norma AASHTO TP 46 (AASHTO, 1994) e com a prENV 00227413 (CEN, 1995b), publicada actualmente como EN 13286-7 (CEN, 2004).

O ensaio triaxial cíclico, segundo a norma ASSHTO TP 46 (AASHTO, 1994), 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 de carga - descarga aplicado é de 1000 para a primeira sequência, correspondente ao condicionamento do provete, e de 100 nas 15 restantes. As condições de carregamento são as apresentadas no Quadro 3.

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

**Quadro 3: Condições de carregamento ensaios triaxiais cíclicos, metodologia AASHTO**

Sequência	Materiais a utilizar em sub-base ou base				Número de ciclos
	$\sigma_3$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{cíclica}}$	$\sigma_{\text{contacto}}$	
	(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;  
 $\sigma_{\text{cíclica}}$  Tensão axial cíclica ou resiliente;  $\sigma_{\text{contacto}}$  tensão de contacto

Do ensaio obtém-se o Módulo Resiliente, do modo apresentado na equação (1), correspondente a cada uma das 15 sequências, sendo aquele valor a média do módulo resiliente encontrado para os 5 últimos ciclos das mesmas.

$$M_r = \frac{\sigma_{\text{cíclica}}}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

onde:  $M_r$  - Módulo resiliente;  $\sigma_{\text{cíclica}}$  - tensão axial cíclica ( $\sigma_{\max} - \sigma_{\text{contacto}}$ );  $\sigma_1 - \sigma_3$  - tensão deviatória;  $\varepsilon_r$  - deformação axial resiliente (recuperada)

A compactação dos provetes, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, foi realizada com martelo vibrador, cujas características foram apresentadas na secção anterior.

Segundo a norma prENV 00227413 (CEN, 1995) o ensaio triaxial cíclico consiste na aplicação de um conjunto de caminhos de tensão em p, q (p e q, tensão normal média e a tensão deviatória, respectivamente), caracterizados pela tensão de confinamento variável e por tensão de confinamento estática inicial,  $\sigma_{3\min}$  (0 ou 10 kPa). Os ensaios incluem uma fase inicial de condicionamento de 20000 ciclos de carga-descarga, seguindo o caminho de tensões com p/q de 2,0 (por forma a estabilizar a deformação permanente e atingir o comportamento resiliente) e uma segunda fase composta por séries de 100 ciclos caracterizadas por quocientes p/q de 0,5; 1,5; 2,0 e 2,5, com vista à análise do comportamento resiliente. As condições de carregamento apresentam-se no Quadro 4.

Os provetes foram compactados de acordo com o referido na secção anterior com recurso a um martelo vibrador Kango e a curva granulométrica dos mesmos foi composta por uma mistura de 4 fracções granulométricas, combinadas em percentagens adequadas e obtidas de um provete original com a seguinte composição: 0-4,75 mm, 4,75-9,50 mm, 9,50-19,0 mm e 19,0-31,5 mm.

**Quadro 4: Condições de carregamento ensaios triaxiais cíclicos, metodologia CEN**

Sequência	$\sigma_3$		q		$\sigma_3$		q		q/p
	min	max	min	max	min	max	min	max	
	(kPa)								
B1	0	50	0	30	10	60	0	30	0,5
B2	0	100	0	60	10	110	0	60	0,5
B3	0	175	0	105	10	185	0	105	0,5
B4	0	250	0	150	10	260	0	150	0,5
D1	0	50	0	150	10	60	0	150	1,5
D2	0	100	0	300	10	110	0	300	1,5
D3	0	150	0	450	10	160	0	450	1,5
D4	0	200	0	600	10	210	0	600	1,5
E1	0	30	0	180	10	40	0	180	2,0
E2	0	60	0	360	10	70	0	360	2,0
E3	0	100	0	600	10	110	0	600	2,0
F1	0	10	0	150	10	20	0	150	2,5
F2	0	15	0	225	10	25	0	225	2,5
F3	0	20	0	300	10	30	0	300	2,5

Dado que quer a tensão axial quer a tensão de confinamento são cíclicas, o módulo resiliente é obtido a partir da equação (2). Todas as tensões e deformações presentes na equação (2) são resilientes ou recuperadas.

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\varepsilon_1(\sigma_1 + \sigma_3) - 2\varepsilon_3\sigma_3} \quad (2)$$

## Resultados da Caracterização Segundo a Metodologia AASHTO

Os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados, para o calcário de Pombal e o granito, segundo a norma AASHTO TP 46 (AASHTO, 1994) para as condições de carregamento apresentadas no Quadro 3 e para duas condições de compactação: condições de laboratório, 95 % da baridade seca máxima e teor em água óptimo, e para a baridade seca e teor em água correspondentes à compactação do material *in situ*. Os valores médios destes parâmetros apresentam-se no Quadro 5 e os valores médios do módulo resiliente obtidos para cada uma das 15 sequências de ensaio apresentam-se no Quadro 6.

**Quadro 5: Condições de compactação dos provetes, metodologia AASHTO**

Material	Condições de Laboratório			Condições <i>in situ</i>		
	w (%)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d/\gamma_{d\max}$ (%)	w (%)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d/\gamma_{d\max}$ (%)
Calcário de Pombal	3,6	2170	95	3,5	2270	99
Granito	4,3	2110	97	4,2	2210	102

Pela análise dos resultados pode dizer-se que os valores do módulo resiliente apresentam uma variação esperada, ou seja, aumentam com o aumento quer da tensão de confinamento quer da tensão cíclica ou deviatória. Noutro sentido, o calcário de Pombal apresenta módulos resilientes mais elevados (cerca de 21% mais) para baridades secas mais elevadas (condições de laboratório versus condições *in situ*) para teores em água da mesma ordem de grandeza. Para o granito verifica-se o contrário para o mesmo tipo de análise mas com uma expressão numérica inferior, (cerca de 10% menor) o que parece confirmar que a resistência destes materiais depende mais da estrutura final devida ao contacto entre os grãos do que da baridade seca final.

**Quadro 6: Módulos resilientes metodologia AASHTO**

Sequência	Mr (MPa)			
	Calcário de Pombal		Granito	
	C. Laboratório	C. <i>in situ</i>	C. Laboratório	C. <i>in situ</i>
1	163	164	88	80
2	201	196	102	91
3	214	222	112	102
4	207	221	116	103
5	240	273	136	122
6	259	301	153	138
7	293	339	187	164
8	331	414	212	194
9	352	450	228	212
10	318	381	217	186
11	341	425	231	210
12	392	514	269	245
13	376	479	265	236
14	394	498	284	250
15	453	612	317	294

**Resultados da Caracterização Segundo a Metodologia CEN**

De acordo com a prENV 00227413, CEN (1995b), os ensaios triaxiais cíclicos foram realizados sobre 5 provetes para diferentes condições de compactação. Os valores de baridade seca e teor em água utilizados são os apresentados no Quadro 7.

**Quadro 7: Condições de compactação dos provetes, metodologia CEN**

Provete	Condições de Laboratório			
	w (%)	w <sub>OPT</sub> -w (%)	$\gamma_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d/\gamma_{d\max}$ (%)
960828	3,6	1,7	2320	97
960830	3,6	1,7	2400	100
960831	3,6	1,7	2250	94
960905	3,9	1,4	2400	100
960906	3,6	1,7	2320	97

O cálculo do módulo resiliente tem por base os valores médios das tensões e deformações medidas durante os últimos 10 ciclos de carga-descarga. Os valores obtidos a partir da equação (2) para as sequências de carga tipo D, E e F encontram-se no Quadro 8.

**Quadro 8: Módulos resilientes metodologia CEN**

Sequência	Mr (MPa)									
	960828	960830	960831	960905	960906	960828	960830	960831	960905	960906
	$\sigma_{3,\min} = 0$ kPa					$\sigma_{3,\min} = 10$ kPa				
D1	242	288	358	174	218	199	247	243	191	193
D2	326	388	385	248	297	292	353	330	268	282
D3	410	484	470	312	374	367	436	413	326	342
D4	446	546	532	363	423	425	504	479	365	400
E1	310	368	327	258	271	267	316	285	242	254
E2	444	514	464	369	394	408	467	417	345	378
E3	584	664	588	465	529	537	608	540	439	501
F1	348	406	339	284	306	265	313	259	224	250
F2	455	517	426	349	386	358	419	347	289	334
F3	535	593	492	392	454	441	507	417	350	401

Pela análise do Quadro 8 pode concluir-se que o módulo resiliente é sensível aos caminhos de tensões e às condições de compactação dos provetes, isto é, teor em água e grau de compactação. Genericamente, os módulos resilientes obtidos para os calcários recorrendo a uma metodologia diferente da metodologia AASHTO, mostraram a mesma tendência de comportamento que os descritos na secção anterior. A contribuição mais importante desta secção é que o módulo resiliente pode variar função das condições de humidade.

## MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Tendo em conta o comportamento não linear dos materiais granulares procedeu-se à sua modelação, recorrendo a diferentes modelos, e foi verificar-se quais os que melhor traduziam o comportamento deste tipo de materiais portugueses. Foram utilizados cinco modelos de comportamento, equações (3) a (7), os quais foram sendo desenvolvidos por diferentes autores, como indicado por Lekarp (Lekarp et al., 2000).

$$Mr = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (3)$$

$$Mr = k_3 \theta^{k_4} \quad (4)$$

$$Mr = k_5 \sigma_d^{k_6} \quad (5)$$

$$Mr = k_7 \theta^{k_8} q^{k_9} \quad (6)$$

$$Mr = k_{10} q^{k_{11}} \sigma_3^{k_{12}} \quad (7)$$

onde: Mr - Módulo resiliente;  $\sigma_3$  - tensão de confinamento;  $\theta$  - primeiro invariante do tensor das tensões ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ );  $\sigma_d$  - tensão deviatória ( $\sigma_d = q = \sigma_1 - \sigma_3$ );  $k_1$  a  $k_{12}$  - constantes

Os modelos e respectivos coeficientes de determinação encontrados para o calcário de Pombal e o granito são os apresentados no Quadro 9.

**Quadro 9: Resultados da modelação do módulo resiliente para o calcário de Pombal e granito**

Condições Laboratório	r <sup>2</sup>	Condições <i>in situ</i>	r <sup>2</sup>	Condições Laboratório	r <sup>2</sup>	Condições <i>in situ</i>	r <sup>2</sup>
Calcário de Pombal				Granito			
$Mr = 880,91 \sigma_3^{0,3916}$	0,89	$Mr = 1488,00 \sigma_3^{0,5195}$	0,89	$Mr = 863,241 \sigma_3^{0,5521}$	0,94	$Mr = 770,65 \sigma_3^{0,5495}$	0,92
$Mr = 522,13 \theta^{0,4388}$	0,89	$Mr = 744,47 \theta^{0,5832}$	0,99	$Mr = 406,38 \theta^{0,6067}$	0,99	$Mr = 366,57 \theta^{0,6088}$	0,99
$Mr = 771,22 \sigma_d^{0,3854}$	0,83	$Mr = 1256,10 \sigma_d^{0,5140}$	0,84	$Mr = 654,05 \sigma_d^{0,5078}$	0,77	$Mr = 607,53 \sigma_d^{0,5204}$	0,80
$Mr = 583,98 \theta^{0,3672} q^{0,0821}$	0,99	$Mr = 883,67 \theta^{0,4647} q^{0,1301}$	0,99	$Mr = 417,43 \theta^{0,5902} q^{0,0193}$	0,99	$Mr = 408,43 \theta^{0,5482} q^{0,0753}$	0,99
$Mr = 973,52 q^{0,1930} \sigma_3^{0,2543}$	0,99	$Mr = 1681,55 q^{0,2696} \sigma_3^{0,3215}$	0,99	$Mr = 945,90 q^{0,1954} \sigma_3^{0,4093}$	0,99	$Mr = 872,65 q^{0,2388} \sigma_3^{0,3798}$	0,99

Pela análise do Quadro 9, pode dizer-se que se obtiveram para todos os modelos correlações de qualidade razoável a muito boa, com coeficientes de determinação a variar de 0,77 a 0,99.

Com o objectivo de estabelecer o modelo que melhor traduz o comportamento mecânico de cada um dos materiais, foi encontrado, para cada um deles, o modelo de melhor qualidade e mais conservativo, isto é, aquele para o qual se obteve o coeficiente de determinação mais próximo de 1 e para o qual se obtiveram os menores valores de módulo resiliente. Os modelos encontrados são os apresentados nas equações (8) e (9), para o calcário de Pombal e granito, respectivamente.

$$Mr = 442,72\theta^{0,5873} \quad (8)$$

$$Mr = 877,37q^{0,2384} \sigma_3^{0,3828} \quad (9)$$

onde: Mr - Módulo resiliente;  $\theta$  - primeiro invariante do tensor das tensões ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ );  
 $\sigma_3$  - tensão de confinamento; q - tensão deviatória

Considerando os dois materiais em simultâneo, o modelo de melhor qualidade e mais conservativo é o apresentado na equação (9).

Os resultados do comportamento resiliente dos ensaios triaxiais cíclicos realizados segundo a metodologia CEN foram também modelados utilizando o modelo Mr- $\theta$ , equação (4).

Os parâmetros encontrados para o modelo apresentam-se no Quadro 10.

**Quadro 10: Resultados da modelação do módulo resiliente para o calcário de Alenquer**

Provetes	$\sigma_{3,\min} = 0$ kPa			$\sigma_{3,\min} = 10$ kPa		
	$k_3$ (MPa)	$k_4$	$r^2$	$k_3$ (MPa)	$k_4$	$r^2$
960828	136,9	0,177	0,84	53,6	0,301	0,91
960830	139,4	0,198	0,87	65,1	0,296	0,92
960831	97,1	0,243	0,96	39,7	0,356	0,97
960905	98,0	0,192	0,84	45,8	0,302	0,94
960906	90,9	0,225	0,88	51,0	0,299	0,92

Na tentativa de comparar os modelos Mr- $\theta$  obtidos a partir das duas metodologias de ensaio, para os materiais em estudo, apresenta-se no Quadro 11 o módulo resiliente obtido a partir de cada modelo para diferentes condições de carregamento: sequências n° 1 e n° 9 da metodologia AASHTO, Quadro 3, e sequência D1 (praticamente igual à AASHTO n° 9) da metodologia CEN, Quadro 4.

Pelos resultados do Quadro 11 pode afirmar-se que a metodologia de ensaio não influencia o módulo resiliente se a comparação for realizada para estados de tensão semelhantes.

## CONCLUSÕES

Analisando os resultados da caracterização dos calcários de Pombal e de Alenquer, pode afirmar-se que apresentam diferenças que, no entanto, permitem a sua comparação em termos de comportamento mecânico. O Granito estudado, como se previa, apresenta um comportamento diferente dos calcários.

Os módulos resilientes dos calcários de Pombal, obtidos com base na metodologia AASHTO, variaram entre, aproximadamente, 160 MPa e 600 MPa e os do granito, variaram entre 80 MPa e 300 MPa. A partir da metodologia CEN foram obtidos para os calcários de Alenquer valores de módulo resiliente da mesma ordem de grandeza dos obtidos para os calcários de Pombal.

No que respeita à modelação do comportamento mecânico a melhor simulação obtida para o granito e para o calcário de Pombal, em conjunto, é a apresentada na equação (9). No entanto, o modelo Mr- $\theta$  (equação 8) é o de melhor qualidade e mais conservativo para o calcário de Pombal. No caso do calcário de Alenquer, caracterizado através da metodologia CEN, pode também concluir-se que a simulação com o modelo Mr- $\theta$  é adequada para prever o módulo



resiliente. Com base nos resultados do Quadro 11, pode concluir-se que os dois materiais calcários apresentam um comportamento semelhante. Assim, utilizando a equação (8) para as condições apresentadas no Quadro 11, obtém-se um resultado muito aceitável em termos de previsão do módulo resiliente para os dois calcários.

**Quadro 11: Módulo resiliente obtido a partir dos modelos Mr- $\theta$  dos 3 materiais estudados para 3 condições de carregamento (sequências AASHTO nº 1 e nº 9 e sequência CEN D1)**

Seq.	Material	Provete	Modelo*	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\theta$	$\theta$	Mr
				(kPa)			(MPa)	
AASHTO nº1	Calcário Pombal	Cond. Laboratorio	Mr = 522,130 <sup>0,4388</sup>	39,3	20,7	80,7	0,0807	173
		Cond. <i>in situ</i>	Mr = 744,470 <sup>0,5832</sup>					172
	Calcário Alenquer	960828	Mr = 53,60 <sup>0,301</sup>					201
		960830	Mr = 65,10 <sup>0,296</sup>					239
		960831	Mr = 39,70 <sup>0,356</sup>					190
		960905	Mr = 45,80 <sup>0,302</sup>					172
		960906	Mr = 51,00 <sup>0,299</sup>					190
	Granito	Cond. Laboratorio	Mr = 406,380 <sup>0,6067</sup>					88
		Cond. <i>in situ</i>	Mr = 366,570 <sup>0,6088</sup>					79
	Equação 8							Mr = 442,720 <sup>0,5873</sup>
CEN D1	Calcário Pombal	Cond. Laboratorio	Mr = 522,130 <sup>0,4388</sup>	210,0	60,0	330,0	0,33	321
		Cond. <i>in situ</i>	Mr = 744,470 <sup>0,5832</sup>					390
	Calcário Alenquer	960828	Mr = 53,60 <sup>0,301</sup>					307
		960830	Mr = 65,10 <sup>0,296</sup>					362
		960831	Mr = 39,70 <sup>0,356</sup>					313
		960905	Mr = 45,80 <sup>0,302</sup>					264
		960906	Mr = 51,00 <sup>0,299</sup>					289
	Granito	Cond. Laboratorio	Mr = 406,380 <sup>0,6067</sup>					207
		Cond. <i>in situ</i>	Mr = 366,570 <sup>0,6088</sup>					187
	Equação 8							Mr = 442,720 <sup>0,5873</sup>
AASHTO nº9	Calcário Pombal	Cond. Laboratorio	Mr = 522,130 <sup>0,4388</sup>	255,0	68,9	392,8	0,3928	346
		Cond. <i>in situ</i>	Mr = 744,470 <sup>0,5832</sup>					432
	Calcário Alenquer	960828	Mr = 53,60 <sup>0,301</sup>					324
		960830	Mr = 65,10 <sup>0,296</sup>					381
		960831	Mr = 39,70 <sup>0,356</sup>					333
		960905	Mr = 45,80 <sup>0,302</sup>					278
		960906	Mr = 51,00 <sup>0,299</sup>					304
	Granito	Cond. Laboratorio	Mr = 406,380 <sup>0,6067</sup>					231
		Cond. <i>in situ</i>	Mr = 366,570 <sup>0,6088</sup>					208
	Equação 8							Mr = 442,720 <sup>0,5873</sup>

Calcário de Pombal e granito,  $\theta$  [MPa]; Calcário de Alenquer,  $\theta$  [kPa]

Por fim, pode dizer-se que a equação (8) pode ser usada para prever os valores de módulo resiliente para os materiais calcários em Portugal (podendo também ser usada para os granitos, mas de um modo mais cuidadoso) e, como mostram os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos realizados de acordo com as metodologias AASTHO e CEN, os parâmetros desta modelação apresentam uma muito importante dependência do estado de tensão, do teor em água e da baridade seca do material.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO (1994). Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, TP 46, AASHTO, USA.
- AFNOR (1990). Granulats, Essai au Bleu de Méthylène, Méthode à la Tache, NF P 18-592, Association Française de Normalisation, France.

- BSI (1990). Soils for civil engineering purposes, Part 4: Compaction-related tests, BS 1377: part 4, British standard institution, England.
- CEN EN 13286-7 (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures, Brussels.
- CEN prEN 00227411 (1995a). *Unbound and hydraulic bound mixtures for roads - test methods for laboratory reference density and moisture content- Part X: Vibrating hammer*, Draft, Brussels, CEN/TC227/WG4/TG2.
- CEN prEN 00227413 (1995b). *Unbound and hydraulic bound mixtures for roads - test methods - cyclic load triaxial test*, Draft, Brussels, CEN/TC227/WG4/TG2.
- IPQ (2002). Ensaio das propriedades mecânicas dos agregados, Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval), NP EN 1097-1, 2ª ed., Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- Lekarp, F.; Isacsson, U. Dawson, A. (2000). State of the art I: Resilient response of unbound aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, Vol, 126, nº 1, pp 66-75.
- LNEC (1966). Solos. Ensaio de Compactação. E 197, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1967a). Solos. Determinação do CBR, E 198, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1967b). Solos. Ensaio de Equivalente de Areia, E 199, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1970). Ensaio de Desgaste pela Máquina de Los Angeles, E 237, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.