

MATERIAIS BRITADOS NÃO LIGADOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: COMPORTAMENTO MECÂNICO PARA CONDIÇÕES PORTUGUESAS

Rosa Luzia, Engenheira Geóloga, MSc, Professora, Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, Av^a do Empresário, 6000-767 Castelo Branco, Portugal, Tel.+351.272339300; Fax+351.272339399; E-mail rluzia@est.ipcb.pt

Luís Picado-Santos, Engenheiro Civil, Agreg., PhD, Professor, Departamento de Engenharia Civil da FCT da Universidade de Coimbra, Portugal, +351.239.797143; Fax. 351.239.797123; E-mail picsan@dec.uc.pt

Resumo

Os agregados britados de granulometria extensa continuam a ser frequentemente utilizados nas camadas não ligadas de pavimentos rodoviários, 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.

Na tentativa de contribuir para o melhor conhecimento desse comportamento desenvolveu-se um trabalho cujo principal objectivo foi a caracterização mecânica e a elaboração de modelos típicos de comportamento para materiais britados provenientes de diferentes litologias, aflorantes nas regiões norte e centro de Portugal, passíveis de serem utilizados em sub-base e base não ligadas de pavimentos rodoviários, nomeadamente calcário e granito.

Esta comunicação descreve os principais resultados obtidos bem como as principais conclusões que se podem retirar dos mesmos, no que respeita ao comportamento global de um pavimento rodoviário.

1- Introdução

Nesta comunicação analisa-se o comportamento de dois materiais britados de granulometria extensa, de origem calcária e granítica, respectivamente, 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 a norma AASHTO TP 46 - 94 [1]. O objectivo foi, 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

No trabalho desenvolvido foi utilizado agregado britado de granulometria extensa de duas origens litológicas: calcário e granito. Assim, foram ensaiadas cinco amostras de material calcário (Figura 1), proveniente de uma pedreira na zona de Pombal, e três amostras de material granítico (Figura 2), sendo que duas foram recolhidas numa pedreira próximo de Celorico da Beira e uma na zona de Braga, interior centro e norte de Portugal respectivamente.

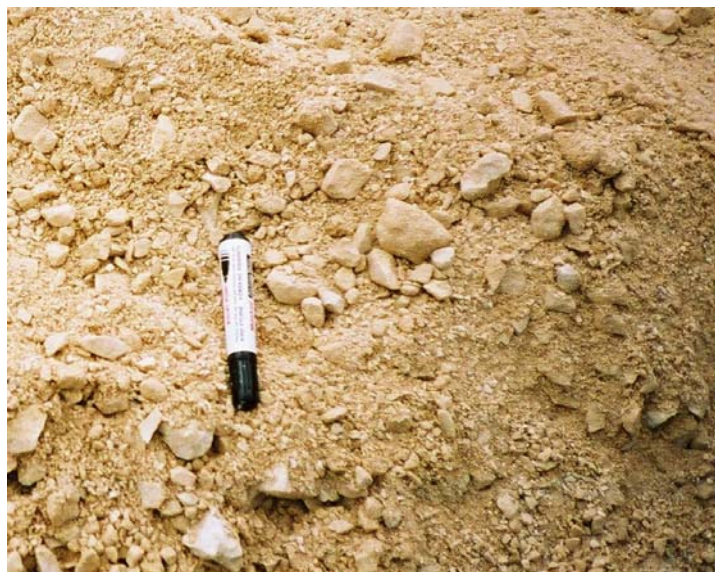


Figura 1- Material calcário



Figura 2- Material granítico

Qualquer dos materiais foi utilizado em camada de sub-base, em obras em construção à altura de desenvolvimento do trabalho. O material calcário foi utilizado no troço Castelo Branco Sul - Fratel, da A23, na zona de Castelo Branco 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.

3- Caracterização Geotécnica

Sobre as amostras recolhidas foram realizados um conjunto de ensaios de laboratório com vista à avaliação das suas características geotécnicas, entre eles: o *Los Angeles* [2] e o micro-Deval [3], o equivalente de areia [4] e o azul de metileno [5] ou o *california bearing ratio* (CBR) [6].

Devido às características granulométricas do material, não foi possível fazer compactação Proctor [7], tendo a mesma sido realizada por vibro-compressão, segundo a norma BS 1377: parte 4 [8], 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 na Figura 3 e no Quadro 1.

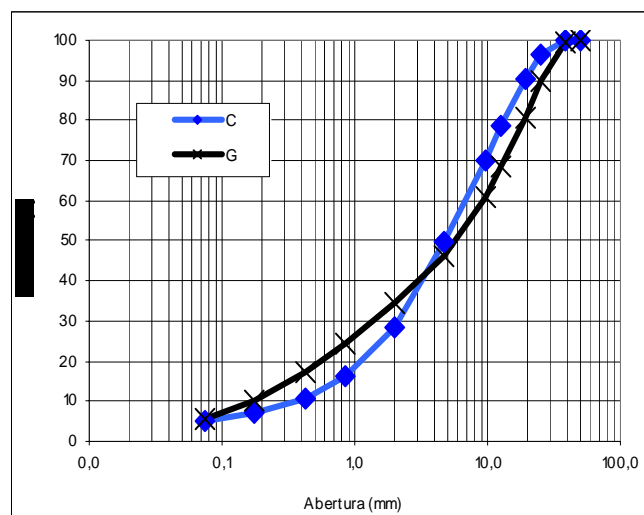


Figura 3- Curvas granulométricas dos dois tipos de material [9]

Quadro 1- Resultados dos ensaios de caracterização

Parâmetro	Unidade	Valor médio	
		Calcário	Granito
Teor em água ótimo	%	3,6	3,5
Baridade seca máxima	g/cm ³	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)		0,05	0,07

4- Caracterização do Comportamento Mecânico em Laboratório

Na caracterização do comportamento mecânico dos materiais em laboratório foram realizados ensaios triaxiais cíclicos de acordo com a norma AASHTO TP 46 [1]. Os ensaios, tratando-se de um material do tipo 1, foram 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 referido na secção 3 e que cumpre as especificações necessárias exigidas na norma usada como referência.

Por cada uma das oito amostras foram realizados 2 ensaios correspondentes aos dois tipos de condições de compactação referidas na norma AASHTO TP 46 - 94 [1], os valores obtidos na compactação em laboratório, teor em água óptimo e 95% da baridade seca máxima, ou os valores obtidos no controlo da compactação *in situ*, devendo ser utilizados estes valores sempre que sejam conhecidos. No Quadro 2 apresentam-se os valores médios de baridade seca e teor em água utilizados nos dois tipos de material.

Quadro 2- 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 ³)	Teor em água (%)	Baridade seca (g/cm ³)
Calcário	3,6	2,17	3,5	2,27
Granito	4,3	2,17	4,2	2,21

O ensaio triaxial cíclico, segundo a norma ASSHTO TP 46 [1], 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.

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.

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.

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

onde: M_r - Módulo resiliente

$\sigma_{cíclica}$ - tensão axial cíclica ($\sigma_{máx} - \sigma_{contacto}$); $\sigma_1 - \sigma_3$ - tensão deviatória

ε_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 4 é composto por prensa 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- Equipamento para ensaios triaxiais cíclicos existente no Laboratório de Mecânica de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

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.

No Quadro 3 apresentam-se os valores médios do módulo resiliente obtidos para cada uma das 16 sequências de ensaio para as condições de compactação, para as condições de carregamento apresentadas no mesmo quadro e para as condições de teor em água e baridade seca apresentados no Quadro 2

Quadro 3- Valores médios de módulo resiliente

Seq.	Materiais a utilizar em sub-base ou base				nº de ciclos	Módulo resiliente			
	σ_3	σ_{max}	$\sigma_{ciclica}$	$\sigma_{contacto}$		Calcário		Granito	
						C. Lab.	C. <i>in situ</i>	C. Lab.	C. <i>in situ</i>
	(kPa)					(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

σ_3 tensão de confinamento; σ_{max} Tensão axial máxima; $\sigma_{ciclica}$ 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*

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.

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 (2) a (6), os quais foram sendo desenvolvidos por diferentes autores, como indicado por Lekarp [10].

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

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

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

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

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

onde: M_r - módulo reversível; σ_3 - tensão de confinamento;

θ - 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

Os modelos e respectivos coeficientes de determinação encontrados para os materiais em estudo são os apresentados nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4- Modelos de comportamento encontrados para o calcário

Cond. Lab.	r^2	Cond. <i>in situ</i>	r^2
$Mr = 880,91 \sigma_3^{0,3916}$	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
$Mr = 973,52 q^{0,1930} \sigma_3^{0,2543}$	0,9973	$Mr = 1681,55 q^{0,2696} \sigma_3^{0,3215}$	0,9988

Quadro 5- Modelos de comportamento encontrados para o granito

Cond. Lab.	r^2	Cond. <i>in situ</i>	r^2
$Mr = 863,241\sigma_3^{0,5521}$	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

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 analisados. Verifica-se, por outro lado, que as melhores correlações, valores de r^2 mais elevados, ocorrem quando se faz depender Mr de θ e q ou de q e σ_3 , ou seja, para os modelos correspondentes às equações (5) e (6).

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 extensão vertical ou deformação permanente no ensaio, obtida a partir do conjunto dos 2500 ciclos de carga - descarga do ensaio, obtiveram-se para o calcário valores a variar de 0,4 % a 1,4 % e para o granito a variar de 1,2 % a 2,4 %, ou seja, valores abaixo dos 5% referidos na norma AASHTO TP 46 - 94 [1].

5- Apreciação dos Resultados do Comportamento Mecânico

Na sequência da modelação do comportamento mecânico a partir dos resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, já apresentada, foi encontrada, para cada um dos modelos, a amostra para a qual a simulação era de melhor qualidade, ou seja, para a qual se obteve o coeficiente de determinação mais próximo de 1.

De entre os modelos correspondentes à melhor simulação, escolheu-se o mais conservador, isto é, aquele para o qual se obtiveram os menores valores de módulo resiliente, tendo sido obtido o modelo da equação (7).

$$Mr = 877,37q^{0,2384} \sigma_3^{0,3828} \quad (7)$$

Após o que e com o objectivo de confirmar os valores de módulo resiliente obtidos nos ensaios realizados sobre os materiais em estudo, se procedeu à análise estrutural de um pavimento tipo, com a estrutura indicada na Figura 5. Esta estrutura foi modelada recorrendo a um comportamento elástico - linear para os materiais.

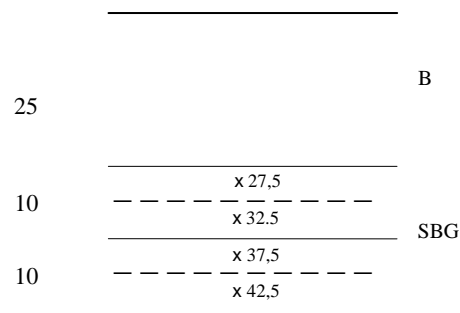


Figura 5- Estrutura de pavimento tipo

Este estudo paramétrico consistiu em determinar o estado de tensão a meio da camada granular utilizando os programas Elsym 5 e Bisar, e determinar o módulo das camadas granulares recorrendo ao modelo encontrado, Equação (7), até que o estado de tensão calculado induzisse um módulo resiliente nas camadas granulares compatível com o dado pelo modelo.

O valor de módulo resiliente encontrado ronda os 40 MPa, valor 3 a 4 vezes inferior aos geralmente considerados no dimensionamento de pavimentos e, de resto, encontrados com a realização dos ensaios triaxiais cíclicos.

Uma outra análise foi realizada com os módulos de deformabilidade obtidos por análise inversa dos resultados dos ensaios realizados *in situ* com o deflectómetro de impacto, tendo-se chegado a valores próximos dos que se tinham encontrado utilizando os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos, portanto parecendo haver *in situ* um estado de tensão semelhante ao simulado nos ensaios triaxiais cíclicos.

A explicação para os valores de módulo resiliente encontrados pode ser:

- Para os ensaios triaxiais cíclicos, o facto de a tensão de confinamento utilizada no ensaio ser mais elevada do que a tensão realmente instalada numa camada granular devido o tráfego;
- Para a caracterização *in situ* realizada com o FWD, o facto de, provavelmente, ocorrerem nas camadas granulares fenómenos de sucção resultantes de variações no teor em água após compactação, devido às alterações climáticas, e seus efeitos no teor em água, entre o verão e o Inverno. Este fenómeno pode levar a um estado de tensão nas camadas granulares mais elevado e, por consequência, a módulos resilientes também mais elevados.

6- 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 [11]) 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*.

No que diz respeito ao comportamento mecânico verificam-se valores de módulo resiliente, função das condições de carregamento, variáveis entre cerca de 160 MPa e 600 MPa para o calcário e entre cerca de 100 e 300 MPa para os granitos

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, pouco significativa no decorrer do ensaio, atingido valores máximos de cerca de 1,4% para os calcários e de 2,4% para os granitos.

Da modelação do comportamento mecânico foi concluído que o modelo que melhor simula o comportamento dos materiais em estudo, embora sendo também o mais conservador, é o modelo de *Pezo*, apresentado na equação (7).

O módulo resiliente obtido a partir de um estudo paramétrico variou entre 40 e 60 MPa, o que corresponde a valores 2,5 a 3 vezes inferiores aos geralmente usados no dimensionamento de pavimentos e obtidos quer nos ensaios triaxiais cíclicos quer nos ensaios *in situ* realizados.

Isto significa que os módulos geralmente utilizados no dimensionamento de pavimentos estão longe do estado de tensão realmente instalado nas camadas granulares, podendo este facto ser responsável pelos problemas que têm ocorrido em alguns pavimentos com camadas betuminosas pouco espessas (inferiores a 15 cm).

Por fim, de referir que estas questões têm como principal objectivo mostrar a importância da investigação com vista à clarificação dos estados de tensão de dimensionamento para bases e sub-bases granulares, por forma a proceder a uma caracterização mecânica mais precisa aquando do dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis

7- Referências Bibliográficas

- [1] AASHTO TP 46 - "Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials". 1994.
- [2] LNEC E 237 - "Ensaio de Desgaste pela Máquina de Los Angeles". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1970.
- [3] 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.
- [4] LNEC E 199 - "Solos. Ensaio de Equivalente de Areia". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1967

- [5] NF P 18-592 - "Granulats. Essai au Bleu de Méthylène. Méthode à la Tache". AFNOR, Paris, 1990.
- [6] LNEC E 198 - "Solos. Determinação do CBR". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1967.
- [7] LNEC E 197 - "Solos. Ensaio de Compactação". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1966.
- [8] BS 1377: part 4 - "Soils for civil engineering purposes. Part 4. Compaction-related tests". British standard institution, 1990.
- [9] LNEC E 233 - "Agregados. Análise Granulométrica". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1969.
- [10] Lekarp, 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.
- [11] LCPC/SETRA - "Réalisation des Remblais et des Couches de Forme". Guide Technique. LCPC/SETRA. Paris, 1992.

Agradecimentos

A investigação que deu origem a esta comunicação foi 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 A23.