

## **MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS A QUENTE EM CENTRAL**

ANTÓNIO BAPTISTA

*PROFESSOR ADJUNTO, ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA DE VISEU*

LUÍS PICADO-SANTOS

*PROFESSOR AUXILIAR, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA FCTUC*

JORGE PAIS

*PROFESSOR AUXILIAR, DEPART. DE ENG. CIVIL DA UNIVERSIDADE DO MINHO*

LUÍS TRABULO

*GRUPO DE CONCESSÕES AENOR E LUSOS CUT*

### **RESUMO**

A reciclagem a quente de misturas betuminosas em central, apesar de apresentar vantagens de ordem económica e ambiental e de ser muito utilizada e até normalizada em muitos países, tem sido pouco utilizada em Portugal. Nesta técnica, além dos componentes habituais, são incorporadas em central, a frio ou aquecidas e em determinada proporção, as misturas betuminosas envelhecidas, provenientes da fresagem de camadas de pavimentos.

Não sendo possível estimar, com relativa segurança, o comportamento deste tipo de misturas, assume particular importância o desenvolvimento de estudos conducentes à sua caracterização mecânica. Para isso, em estreita colaboração com uma concessionária rodoviária, foram executados quatro trechos experimentais em macadame betuminoso, um sem incorporação de fresado e os restantes com incorporações de 20%, 30% e 40%.

Foram realizados ensaios que permitiram avaliar algumas características das misturas betuminosas recicladas a quente em central, as quais foram comparadas com as das misturas betuminosas sem incorporação de fresado. Neste artigo descrevem-se aqueles resultados e comparação, apontando-se caminhos para a utilização na tecnologia portuguesa de misturas betuminosas recicladas a quente em central.

### **1. INTRODUÇÃO**

A reciclagem a quente apresenta claras vantagens de ordem económica e ambiental. Desde logo, pela economia ao nível dos agregados e do betume, esta última mais acentuada com o

aumento que se tem observado no preço do crude. Ao nível ambiental podem indicar-se o menor consumo de recursos naturais (betume e agregados) e uma melhor aplicação dos materiais provenientes da fresagem. As desvantagens estão normalmente associadas à produção, nomeadamente relacionados com a quebra na capacidade de produção das centrais e com o maior aquecimento dos agregados. Refira-se no entanto que embora a temperatura de aquecimento seja mais alta que o normal, a quantidade de agregados também é menor.

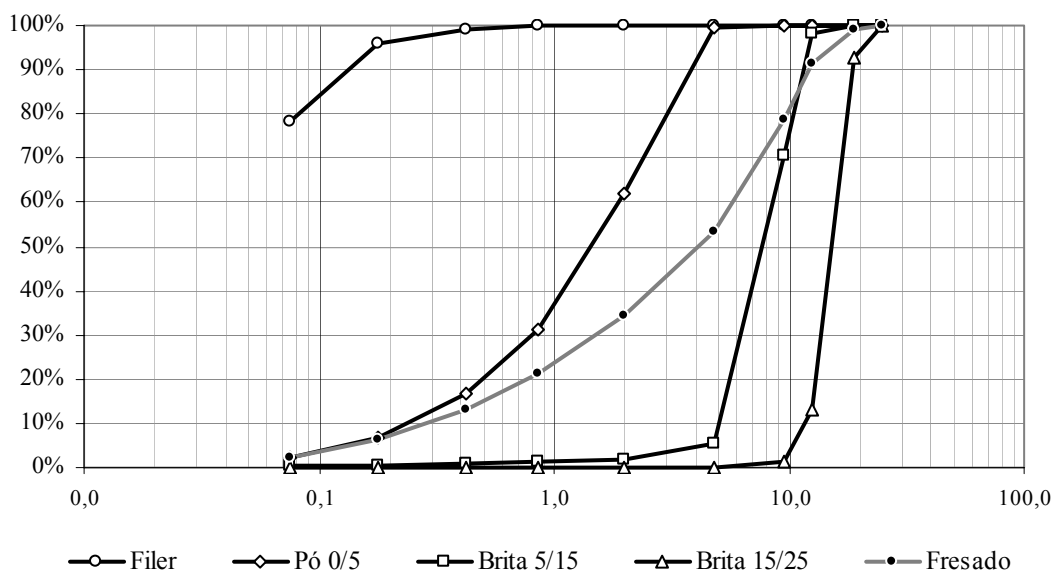
O trabalho que se apresenta surge na sequência de estudo de formulação anterior [1] e constitui um apanhado dos principais resultados apresentados em relatório técnico recente [2].

## 2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

### 2.1. Material fresado e agregados

O material fresado com betume, apresentava uma granulometria 0/40 antes da incineração e 0/20 após a incineração. Determinou-se a percentagem de betume de três amostras do fresado disponível pelo método de incineração (ASTM D6307), tendo-se chegado a um valor médio corrigido de 4,1%. Com as amostras de agregado resultantes, determinou-se a granulometria de referência do agregado do fresado.

Na figura 1 apresenta-se a granulometria do agregado do fresado e dos agregados novos a incorporar na mistura (brita 15/25, brita 5/15, pó 0/5 e filer). Embora fosse desejável usar na produção betume 50/70, recorreu-se ao betume 35/50 disponível na central.



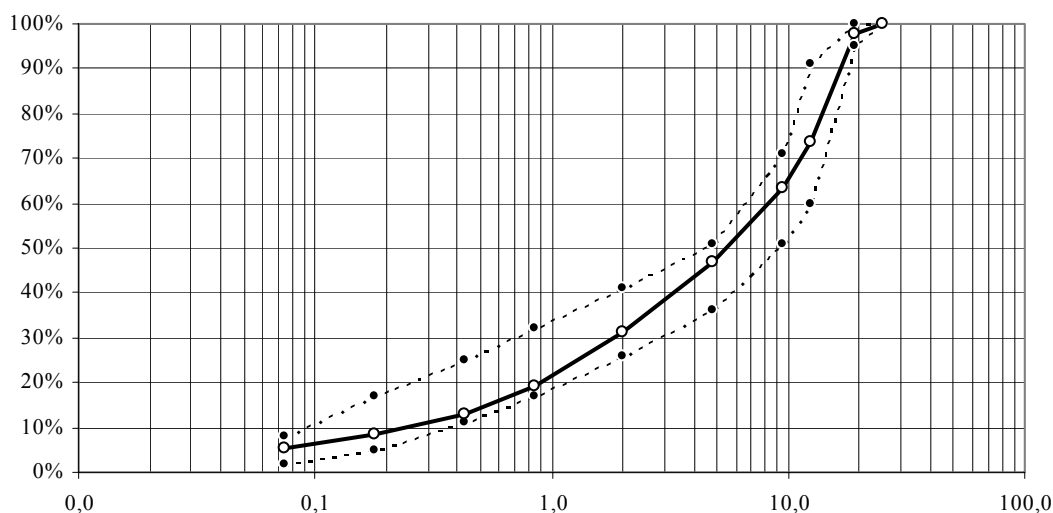
**Figura 1 – Curvas granulométricas dos agregados e do fresado**

## 2.2. Fórmulas de trabalho

Determinou-se, para cada taxa de reciclagem (TR), a composição granulométrica da mistura de agregados de modo a verificar o fuso granulométrico de macadame betuminoso, a respeitar em camadas de base ou regularização e com espessura máxima de 10cm (Fuso A). Recorrendo à habitual por manipulação numérica, obtiveram-se as proporções indicadas no quadro 1. Como exemplo, mostra-se na figura 2 o encaixe no fuso granulométrico para a taxa de reciclagem de 20%.

**Quadro 1 – Composição granulométrica dos agregados**

AGREGADO	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
Filer	5,0 %	5,2 %	5,6 %	6,0 %
Pó 0/5	41,5 %	30,4 %	24,5 %	18,6 %
Brita 5/15	23,5 %	16,4 %	12,6 %	9,0 %
Brita 15/25	30,0 %	28,0 %	27,3 %	26,4 %
Fresado	0,0 %	20,0 %	30,0 %	40,0 %



**Figura 2 – Verificação do fuso granulométrico para a taxa de reciclagem de 20%.**

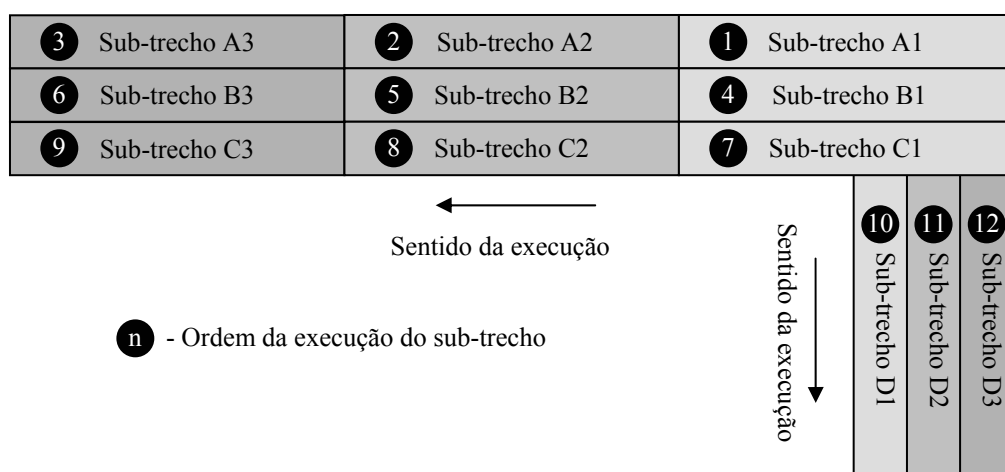
Com base nos resultados de estudo de formulação referido [1] e tomando como referência alguns critérios habitualmente seguidos para o macadame betuminoso tradicional, nomeadamente os limites da relação ponderal filer betume, adoptaram-se as percentagens “óptimas” de betume indicadas no quadro 2. Ora, como estas percentagens dizem respeito ao ligante final, foi necessário determinar a percentagem de ligante novo a adicionar, para cada taxa de reciclagem, descontando a proporção de ligante existente no fresado que depende da TR e da percentagem de betume do fresado (quadro 2).

**Quadro 2 – Percentagens de betume total, do fresado e a adicionar**

Percentagem de Betume	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
Total	4,2	4,3	4,4	4,7
Fresado	0,0	0,8	1,2	1,6
Novo	4,2	3,5	3,2	3,1

### 3. TRECHOS EXPERIMENTAIS

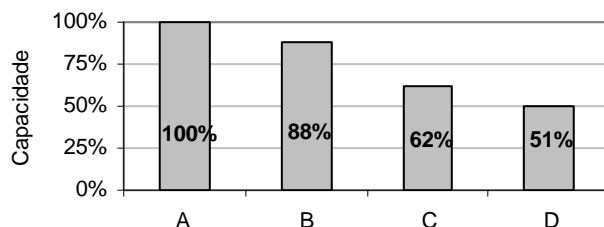
Além das percentagens de betume de referência, consideraram-se outras duas, uma 0,5% abaixo e outra 0,5% acima. Resultaram assim três sub-trechos por cada trecho, num total de 12 sub-trechos. Os trechos foram executados em Aveiro pela empresa Rosas Construtores SA, em um dos arruamentos do seu estaleiro, e as misturas foram produzidas numa central descontínua já preparada para a incorporação de fresado. Na figura 3 faz-se uma representação esquemática da localização relativa dos trechos e da sua ordem de execução. Os sub-trechos com TR= 40% foram realizados em paralelo e os restantes em contínuo.



**Figura 3 – Representação esquemática dos trechos experimentais**

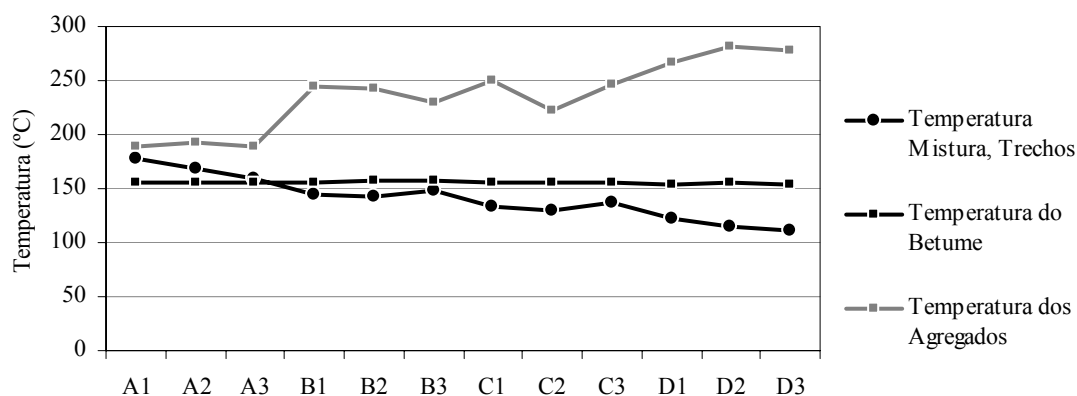
O fabrico deste tipo de misturas em central descontínua, com incorporação do fresado a frio, conduz a que a temperatura a uma temperatura de aquecimento dos agregados superior ao habitual e tanto maior quanto maior for a taxa de reciclagem. Para contornar alguns problemas relacionados com a temperatura elevada dos agregados e da humidade existente no fresado a solução passa por aumentar um pouco o tempo de mistura e fazer uma pré-mistura “em seco” durante algum tempo, e só depois adicionar o betume (RUBIO, [3]). Esta operação permite homogeneizar o material a reciclar, eliminar alguma água existente e, não menos importante, baixar a temperatura dos agregados novos.

Assim, programaram-se na central tempos de pré-mistura de 10, 15 e 20 s, respectivamente para as taxas de 20, 30 e 40%. A capacidade máxima de produção da central foi afectada, principalmente para as taxas de 30 e 40% (figura 4). Para condições de produção normais pode dizer-se que este aspecto tem uma importância moderadamente relevante.



**Figura 4 – Capacidade de produção, expressa em percentagem da sua produção normal**

Na figura 5 apresenta-se a evolução da temperatura das misturas, dos agregados e do betume, para os 12 sub-trechos. Embora se tenha aumentado progressivamente a temperatura dos agregados com o aumento da taxa de reciclagem, a temperatura das misturas foi baixando com o aumento da proporção de fresado e, em consequência disso, observou-se uma menor trabalhabilidade das misturas recicladas, facto para que as equipas de trabalho já estavam alertadas. No quadro 3 indica-se, para cada trecho, a temperatura média dos agregados e do betume no fabrico e ainda da temperatura das misturas na compactação. Pode dizer-se que a temperatura no trecho A esteve um pouco acima do desejável e que no trecho D, embora baixa, permitiu realizar a compactação.



**Figura 5 – Temperatura dos agregados, do betume e das misturas, nos 12 sub-trechos**

**Quadro 3 – Temperatura média (°C) dos agregados, do betume e das misturas**

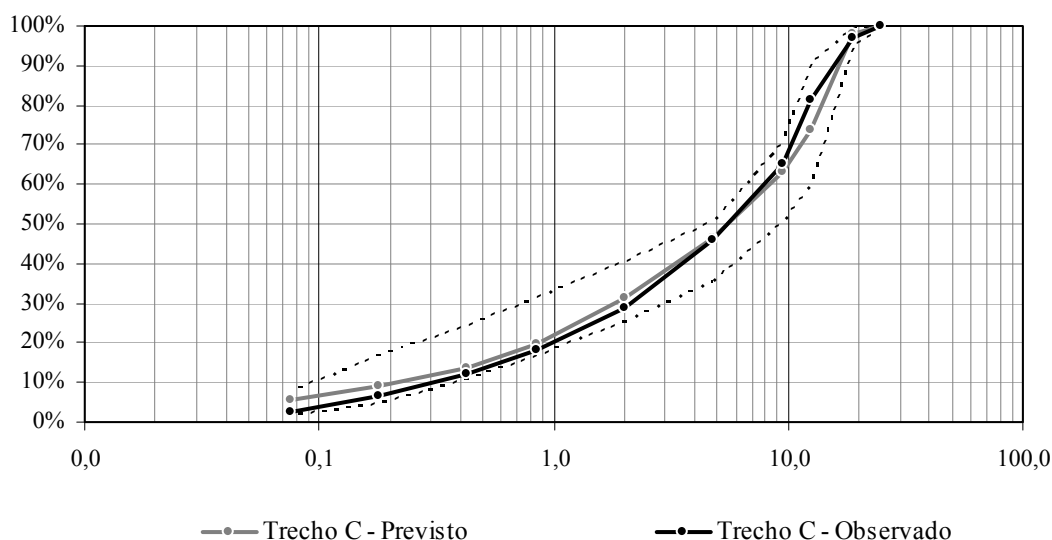
Material	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho D
Agregados	189,9	238,8	239,6	275,6
Betume	156,0	157,0	155,8	154,8
Misturas	168,9	144,7	133,3	116,2

### 3. CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

Durante a execução dos trechos experimentais recolheram-se amostras de misturas betuminosas em todos os 12 sub-trechos, para verificação da granulometria e da percentagem de betume. Tomaram-se como referência os valores obtidos por incineração (quadro 4), os quais são muito próximos do previsto e respeitam a tolerância habitual. Após a incineração, procedeu-se à análise granulométrica do agregado, de modo a poder verificar o encaixe no fuso granulométrico. Verificou-se que as granulometrias, na generalidade dos casos, cumpriam o fuso e apresentavam um andamento idêntico ao previsto no estudo de composição. Como exemplo, mostra-se na figura 6 a granulometria prevista e a observada no caso do trecho C.

**Quadro 4 – Percentagem de betume total (%): prevista e obtida por incineração**

Percent. betume	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Prevista	3,7	4,2	4,7	3,8	4,3	4,8	3,9	4,4	4,9	4,2	4,7	5,2
Incinerção	3,6	4,1	4,6	3,8	4,4	4,7	4,1	4,6	5,0	4,3	4,7	5,1



**Figura 6 – Granulometria das misturas do trecho C: prevista e observada**

Foram também recolhidos tarolos e levantadas lajes que permitiram, após serragem e rectificação, obter os seguintes provetes: 36 lajetas  $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$ , sendo 3 por sub-trecho; 120 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, sendo 10 por sub-trecho; 144 vigas de  $80 \times 80 \times 400 \text{ mm}^3$ , sendo 12 por sub-trecho. No quadro 5 apresentam-se os valores médios das características das misturas compactadas dos provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e das lajetas, a usar no presente trabalho. A baridade máxima teórica foi determinada com o picnómetro de vácuo, tal como é definido na ASTM D 2041.

**Quadro 5 – Características médias das misturas**

Grandeza	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Bmed	2,364	2,384	2,399	2,385	2,403	2,429	2,367	2,384	2,454	2,436	2,405	2,448
Bmax	2,504	2,497	2,493	2,516	2,494	2,475	2,506	2,495	2,486	2,490	2,478	2,467
n (%)	5,6	4,5	3,8	5,2	3,7	1,9	5,5	4,5	1,3	2,2	2,9	0,8
TVB (%)	8,2	9,4	10,6	8,7	10,2	11,0	9,3	10,5	11,8	10,1	10,9	12,0
VMA (%)	13,8	13,9	14,4	13,9	13,8	12,9	14,9	15,0	13,1	12,3	13,8	12,8

## 5. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Depois de executados os trechos experimentais foi avaliada a capacidade de carga com recurso a deflectómetro de impacto (FWD). Os ensaios foram realizados com placa de 300mm de diâmetro e foram impostas quatro alturas de queda, se bem que, em termos de análise, apenas se consideraram as duas últimas, por se admitir que os dois primeiros impactos apenas servem para ajustar/calibrar o equipamento. Foram realizadas leituras em nove pontos: no centro da placa ( $f_0$ ) e em pontos afastados, em mm, de: 300 ( $f_1$ ), 450 ( $f_2$ ), 600 ( $f_3$ ), 900 ( $f_4$ ), 1200 ( $f_5$ ), 1500 ( $f_6$ ), 1800 ( $f_7$ ) e 2100 ( $f_8$ ).

O pavimento ensaiado, construído em zona de aterro, apresentava uma estrutura base constituída por uma camada de materiais de natureza muito diversa (materiais granulares e aglutinados, nomeadamente desperdícios de misturas betuminosas ali depositados), com espessura da ordem dos 25 cm e encarada na análise como uma “sub-base”, e que veio revelar características de deformabilidade muito variáveis. Os ensaios foram realizados com uma temperatura à superfície do pavimento que oscilou entre os 12°C e os 13°C.

Depois de algumas tentativas, considerou-se na análise a estrutura tipo indicada na figura 7. Recorrendo à aplicação ELSYM5 na análise estrutural e seguindo a metodologia habitualmente designada por análise inversa, ou *back-calculation*, determinaram-se os módulos de deformabilidade das camadas.

Camada Betuminosa ( $E_m, \mu_{sb}=0,30$ )	$h \approx 0,10m$
“Sub-base” ( $E_{sb}, \mu_{sb}=0,30$ )	0,25m
Fundação ( $E_{sf}, \mu_{sf}=0,35$ )	2,00m
$E = 1000 \text{ MPa}; \mu=0,30$	$h=\infty$

**Figura 7 – Estrutura considerada na análise**

No quadro 6 indicam-se, para os 12 sub-trechos, o módulo de deformabilidade obtido na análise, a uma temperatura da ordem dos 13°C, e os respectivos valores corrigidos para uma temperatura de referência de 25°C. O valor médio do módulo de deformabilidade, acaba por ser mais alto nos trechos com misturas recicladas (7400, 7900 e 7500 MPa, respectivamente em B, C e D), do que nas misturas de macadame tradicional (6330MPa).

**Quadro 6 – Módulos de deformabilidade observados a 13°C e corrigidos para 25°C**

Módulo	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
E <sub>13</sub> (MPa)	10000	16000	16000	15000	16000	16000	20000	19000	11000	18000	16000	12000
E <sub>25</sub> (MPa)	4520	7230	7230	7090	7560	7560	9480	9010	5210	8810	7830	5870

## 6. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas, foram realizados ensaios com simulador de tráfego (*Wheel tracking*) e ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas. Em ambos os casos, adoptou-se uma temperatura de 45°C, a qual representa, no nosso país, o máximo a adoptar nos ensaios de caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas para camada de base (Capitão, [4]; Freire, [5]).

Os ensaios de *Wheel tracking*, foram realizados de acordo com a prEN 12697-22, *Test Methods for Hot Mix Asphalt – Wheel Tracking*, (CEN, [6]). O condicionamento, ao ar, decorreu durante um mínimo de seis horas e adoptou-se uma duração de 45 minutos e uma velocidade de aplicação da carga de 21 ciclos/minuto, correspondendo cada ciclo a duas passagens.

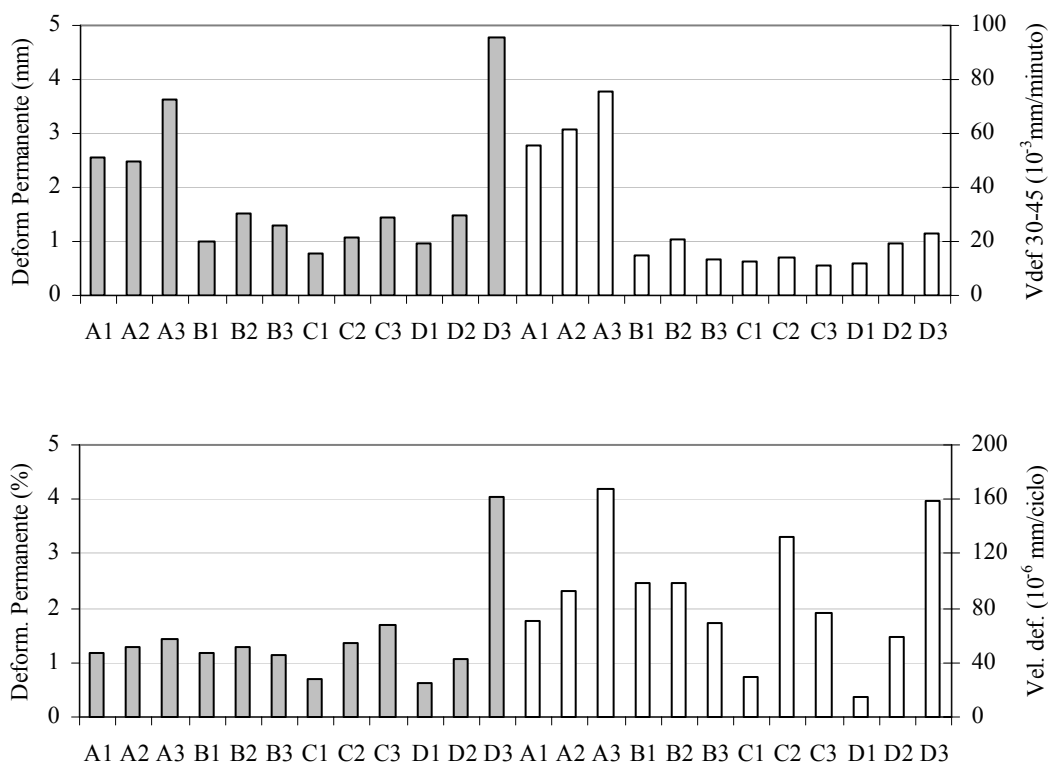
Os ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas foram realizados na *Máquina de Ensaios com Aplicação de Cargas Repetidas*, desenvolvida no DEC-FCTUC, a qual permite executar também ensaios de flexão de cargas repetidas com vista à avaliação das características de deformabilidade e de resistência à fadiga. Em [4] pode encontrar-se uma descrição adequada do equipamento. Estes ensaios desenrolaram-se de acordo com a prEN 12697-25, *Bituminous mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 25: Cyclic Compression test*, (CEN, [7]). O condicionamento, ao ar, foi cumprido durante um mínimo de seis horas e adoptou-se uma carga do tipo sinusoidal com repouso de 1 segundo, sendo a pressão de 150 kPa, assegurada para a carga de 1,1 kN, e a duração de 2 horas (3600 ciclos).

A análise dos resultados dos ensaios de *Wheel tracking* e de compressão uniaxial de cargas repetidas, conduziu ao valores de deformação permanente e de velocidade de deformação indicados no quadro 7 e que se representam graficamente na figura 8.



**Quadro 7 – Resumo da análise dos resultados dos ensaios de Wheel Tracking e de compressão uniaxial de cargas repetidas**

Parâmetro		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Wheel Tracking	Deformação permanente (mm)	2,57	2,50	3,64	1,00	1,51	1,31	0,76	1,08	1,46	0,97	1,48	4,77
	$V_{def-30/45}$ ( $10^{-3}$ mm/minuto)	55,5	61,2	75,2	14,7	21,0	13,4	12,7	14,4	11,4	11,8	19,6	23,0
Compr. Uniaxial	Deformação permanente (%)	1,19	1,27	1,42	1,18	1,29	1,15	0,69	1,35	1,70	0,62	1,08	4,06
	$V_{def}$ ( $10^{-6}$ mm/ciclo)	70	93	167	99	98	69	30	132	76	15	59	159



**Figura 8 – Representação gráfica dos valores do quadro 7**

Em termos de deformação permanente observa-se a mesma tendência nos dois tipos de ensaio (parte esquerda dos gráficos). Nos trechos A, C e D verifica-se um aumento da deformação com o aumento da percentagem de betume. Já nos sub-trechos Bi, existe uma certa uniformidade de valores. O mesmo se poderá dizer sobre a velocidade de deformação, sendo a única exceção o sub-trecho C3 no ensaio de compressão uniaxial. No global pode mesmo afirmar-se que o comportamento à deformação permanente das misturas dos trechos com incorporação de fresado (trechos B, C e D) é idêntico ou melhor que o da mistura de macadame normal (trecho A).

## **7. CONCLUSÕES**

Uma análise individualizada por trecho, permitiu concluir que entre as composições estudadas, existe uma indicação de melhor desempenho das misturas dos sub-trechos A2, B2, C1 e D1, as quais apresentavam percentagens de betume muito idênticas. Espera-se que esta conclusão venha a ser confirmada na avaliação dos módulos de deformabilidade e da vida à fadiga, a realizar em laboratório a curto prazo.

Por fim, seria desejável que a reciclagem a quente em central possa constituir uma boa alternativa tecnológica para a reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis. Para tal é necessário continuar com o trabalho que conduzirá a uma normalização de procedimentos adaptados à tecnologia portuguesa. Para isto, para além da conformidade técnica das misturas, interessaria fazer uma análise económica circunstanciada de todo o processo, que confirme as vantagens desta já que as de ordem ambiental são inegáveis.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores não poderiam deixar de expressar publicamente o seu agradecimento à LUSOS CUT pela importante parceria e à empresa Rosas Construtores, pela preciosa colaboração na execução dos trechos experimentais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] - Picado-Santos, L.; Baptista, A., “IP5 – Troço Angeja/A1. Estudo da Reciclagem do Pavimento”, 2.º Relatório, FCTUC/LUSOS CUT, Outubro de 2002.
- [2] - Picado-Santos, L.; Baptista, A., “Reciclagem a quente de misturas betuminosas em central - Relatório Técnico”, FCTUC/LUSOS CUT, Outubro de 2004.
- [3] – Rubio, A., “Reciclado de Mezclas Bituminosas en Planta en Caliente: Proceso, ventajas y limitaciones, empleo y perspectivas”, Jornadas sobre Mezclas Bituminosas Recicladadas en Caliente, Barcelona, 18 a 20 de Setembro de 2001.
- [4] – Capitão, S., “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de alto Módulo de Deformabilidade”, Dissertação submetida à FCT da Universidade de Coimbra, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, DEC-FCTUC, Coimbra, 2003.
- [5] - Freire, A., “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”, Dissertação submetida à FCT da Universidade de Coimbra, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Lisboa-LNEC, 2002.
- [6] – CEN – European Committee for Standardization, “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel Tracking“, prEN 12697-22, Bruxelas, 1998.
- [7] – CEN – European Committee for Standardization, “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic Compression test“, prEN 12697-25, Bruxelas, 2001.