

Artigo REF: 49A013

## **ENSAIOS LABORATORIAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

**Dinis Gardete<sup>1(\*)</sup>, Luís Picado Santos<sup>2</sup>, Jorge Pais<sup>3</sup> e Rosa Luzia<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, Depart. Eng<sup>a</sup> Civil – Castelo Branco, Portugal

<sup>2</sup>Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Depart. Eng<sup>a</sup> Civil - Coimbra, Portugal

<sup>3</sup>Universidade do Minho. Depart. Eng.<sup>a</sup> Civil – Guimarães, Portugal

(\*)Email: dgardete@est.ipcb.pt

### **RESUMO**

*As causas de formação de rodeiras devido à deformação permanente em misturas betuminosas têm vindo a agravar-se, esperando-se que os insucessos relacionados com esta patologia venham a aumentar. As normas europeias já incluem ensaios laboratoriais para caracterização à deformação permanente, como sejam, o ensaio de Wheel-Tracking e os de Compressão Uniaxial Cíclico e Triaxial Cíclico. Neste trabalho, faz-se a comparação dos resultados obtidos para uma mistura betuminosa corrente em Portugal utilizando os ensaios referidos e o ensaio de Corte a Altura Constante. Observa-se que os ensaios apresentam resultados similares, apresentando potencial para uma utilização em Portugal. Com base nos resultados a utilização de ensaios mais simples apresenta-se vantajosa, pois permite obter resultados de qualidade análoga utilizando ensaios mais acessíveis.*

### **INTRODUÇÃO**

A deformação permanente de misturas betuminosas é uma das patologias de pavimentos flexíveis que mais preocupa as autoridades rodoviárias (COST 333, 1999 e TRB, 2005). É urgente implementar métodos que evitem que os insucessos venham a aumentar pois os factores que originam esta patologia têm vindo a agravar-se, como seja o aumento da agressividade das cargas do tráfego rodoviário pesado. Ainda assim, não existem ainda metodologias específicas implementadas que permitam evitar o seu aparecimento. Neste sentido a introdução de novos métodos de avaliação do desempenho de misturas betuminosas à deformação permanente apresenta-se como um imperativo.

Para caracterizar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas têm sido desenvolvidos diversos ensaios laboratoriais. As novas normas europeias incluem, com este objectivo, os ensaios de Wheel-Tracking e os ensaios de Compressão Uniaxial Cíclico e Triaxial Cíclico. Nos EUA foi desenvolvido e tem sido utilizado o ensaio de Corte a Altura Constante (RSST-CH), este tem sido pouco utilizado fora dos EUA, embora exista capacidade de o realizar em instituições portuguesas.

No entanto para a implementação na prática dos ensaios referidos nas normas europeias é necessário ultrapassar alguns obstáculos como seja a definição com precisão dos procedimentos e condições de ensaio e definir valores limites de aceitação para os resultados. Acresce o facto de não ser interessante integrar no mercado ensaios diferentes cujo objectivo é único. Deste modo, torna-se importante comparar os ensaios e os seus resultados

tendo em vista factores como a sua facilidade de realização, aquisição de equipamento e adequação à prática corrente no país.

Para este estudo foram ensaiados provetes executados em laboratório e provetes recolhidos de trechos experimentais realizados com equipamento de construção. Seleccionou-se uma mistura de ampla utilização em Portugal. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas europeias excepto o ensaio de Corte a Altura Constante para o qual se utilizou a norma americana correspondente (AASHTO TP7-1). Procurou-se colmatar algumas lacunas dos procedimentos descritos nas normas procurando soluções que estejam próximas do que se espera ser adoptado na prática.

Os resultados dos diferentes ensaios foram comparados de modo a verificar se cumprem com os fins a que se destinam e se podem ser utilizados como meios de controlo da composição da mistura e como meios de controlo da qualidade da colocação da mistura em obra. É precisamente nesta óptica que este trabalho é orientado.

## TRABALHO EXPERIMENTAL

Foram ensaiados provetes executados em laboratório e provetes recolhidos de trechos experimentais realizados com equipamento de construção em obra. A mistura seleccionada para a realização do estudo foi um macadame com uma granulometria que respeita o fuso A do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, CE EP (JAE, 1998). As misturas betuminosas realizadas em laboratório e nos troços experimentais seguiram a mesma curva granulométrica, esta é apresentada na Figura 1. De modo a variar a susceptibilidade da mistura à deformação permanente e assim poder comparar os resultados dos diversos ensaios em termos de classificação relativa das misturas foram utilizadas percentagens em betume (Pb) de 3,7%, 4,2% e 4,7%. Esta variação permitiu também analisar a sensibilidade dos ensaios. O betume utilizado na realização das misturas em laboratório foi um betume da classe 50/70. No entanto, para realização dos troços experimentais o betume utilizado foi da classe 35/50.

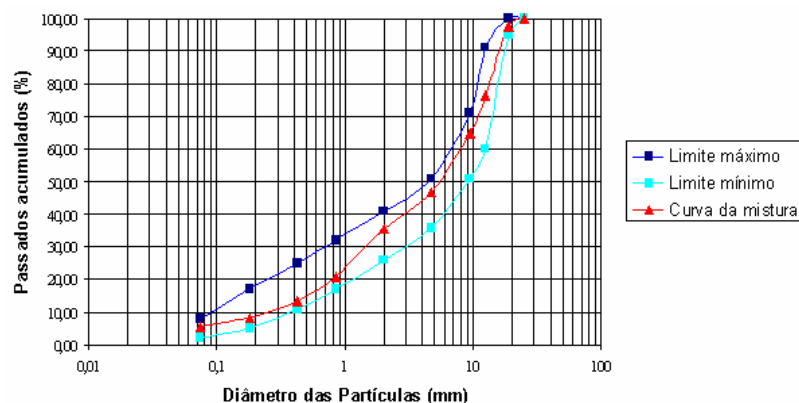


Figura 1. Curva granulométrica da mistura e limites definidos no CE EP.

## Ensaio de Wheel-Tracking

O equipamento de Wheel-Tracking utilizado enquadra-se nos equipamentos de pequena dimensão, Small Size Device Model A. Nestes equipamentos o provete é condicionado e ensaiado à temperatura desejada através do aquecimento do ar na câmara de ensaio.

Os provetes ensaiados foram lajes com 305x305x80 mm conforme indicado na prEN 12697-22 (CEN, 2002). A compactação, em laboratório foi realizada com a ajuda de um pequeno cilindro de rolos utilizando vibração. Os provetes de obra foram recolhidos em lajes com dimensão dos lados de 350x350 mm e altura com cerca de 10 cm, tendo sido posteriormente cortados com uma serra circular de forma a apresentarem as dimensões iguais às dos provetes de laboratório. Foram ensaiados 6 provetes em laboratório (2 por percentagem em betume) e 9 provetes recolhidos em obra (3 por percentagem em betume).

Durante o ensaio o provete é submetido à acção de um carregamento aplicado através de uma roda de borracha maciça que realiza um movimento de vai-vem sobre o provete. O peso aplicado pela roda é de cerca de 70 kg exercendo uma tensão de contacto de aproximadamente 700 kPa. Os ensaios têm a duração de 45 minutos, com uma frequência de 21 ciclos por minuto (cada ciclo corresponde a duas passagens da roda). A face ensaiada foi nos provetes de laboratório foi a face contrária à da compactação e nos de obra foi a face de compactação, este facto deveu-se a motivos de facilidade de realização do ensaio pois estas eram as faces que apresentavam menos imperfeições.

A temperatura de ensaio foi de 45°C, que se julga ser uma temperatura representativa das condições de serviço deste tipo de misturas betuminosas em Portugal (Picado-Santos, 2000 e Freire *et al*, 2006). Esta temperatura foi utilizada em todos os ensaios, obtendo-se deste modo uma caracterização do comportamento da mistura nos diferentes ensaios para condições semelhantes.

### **Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico**

O procedimento utilizado para a realização do ensaio é o descrito na prEN 12697-25a (CEN, 2001). O ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico consiste em submeter o provete de mistura betuminosa a uma carga cíclica de compressão axial. As dimensões dos provetes utilizadas foram de 100 mm de altura e 150 mm de diâmetro.

Os provetes de laboratório foram compactados em moldes cilíndricos utilizando um compactador de placa vibratória. Os provetes foram compactados nas suas dimensões finais. Os provetes dos trechos experimentais foram carotados directamente nos trechos experimentais utilizando uma coroa de 150 mm, deste modo os provetes foram carotados com o seu diâmetro final. A altura do provete e perpendicularidade das faces foram ajustadas com uma serra circular sendo estas depois rectificadas de modo a ficarem sem imperfeições. Foram ensaiados 4 provetes por percentagem em betume para a série de laboratório e dois provetes por percentagem em betume para a série recolhida em obra.

A temperatura de ensaio utilizada foi de 45°C. O carregamento utilizado seguiu uma forma sinusoidal com repouso. Os tempos de carregamento e de repouso tiveram ambos a duração de 1 segundo e o carregamento teve uma tensão máxima de compressão de 150 kPa. Os ensaios tiveram uma duração de 3600 ciclos de carregamento.

### **Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico**

O procedimento utilizado, no âmbito deste trabalho, para a realização do ensaio é o descrito na prEN 12697-25 parte b (CEN, 2001). A principal diferença entre este ensaio e o ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico é que o provete se encontra sujeito a uma tensão de confinamento estática durante o ensaio. Esta tensão é realizada colocando o provete dentro de uma câmara com água que é pressurizada durante o ensaio. A água é aquecida à temperatura de ensaio, no entanto o contacto directo entre o provete e a água é evitado pela colocação de

uma membrana de borracha que o envolve. As dimensões e os processos para a realização dos provetes triaxiais em laboratório e em obra foram análogos aos utilizados para a realização dos provetes destinados ao ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.

A pré-norma não especifica com exactidão os níveis de tensão e a frequência de carregamento a utilizar para a realização do ensaio, deste modo, optou-se por um carregamento de forma semelhante ao utilizado no ensaio uniaxial, carregamento sinusoidal com tempos de carregamento e de repouso de 1 segundo. Utilizaram-se três níveis de tensão dentro dos intervalos indicados na pré-norma. Deste modo, utilizou-se um nível de tensão baixo, um nível de tensão elevado e um nível de tensão intermédio, considerando os intervalos indicados na prEN 12697-25b para a tensão máxima axial,  $\sigma_1$ , e para a tensão de confinamento,  $\sigma_c$ . Os níveis de tensão considerados foram  $\sigma_1=150\text{Kpa}$  e  $\sigma_c=50\text{Kpa}$ ;  $\sigma_1=300\text{Kpa}$  e  $\sigma_c=100\text{Kpa}$ ;  $\sigma_1=600\text{Kpa}$  e  $\sigma_c=200\text{Kpa}$ .

Foram ensaiados dois provetes por percentagem em betume para cada nível de tensão tanto para a série de laboratório com para a série de obra, ou seja 18 provetes por série. A duração e a temperatura de ensaio foram semelhantes às do ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.

### **Ensaio de Corte a Altura Constante**

Como referido anteriormente este ensaio foi desenvolvido nos EUA no âmbito do programa SUPERPAVE do SHRP. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma AASHTO TP7-01 (AASHTO, 2001). Esta norma descreve vários procedimentos de ensaio, o utilizado neste trabalho foi o designado por *Repeated Simple Shear Test at Constant Height* (RSST-CH) pois é o que tem sido utilizado na caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. Neste ensaio são aplicadas tensões de corte aos provetes. O carregamento aplicado é cíclico e tem uma forma sinusoidal com repouso. O carregamento tem um tempo de carga de 0,1 segundos e um tempo de repouso de 0,6 segundos, solicitando o provete sempre na mesma direcção. A tensão de corte máxima é de 69 kPa.

Os provetes têm as dimensões de 50 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Em laboratório foi produzida uma laje com 50 mm de altura e depois foram carotados dessa laje os provetes com o diâmetro requerido. Para a compactação da laje foi utilizado um pequeno cilindro de rolos vibratórios. Como em obra a espessura da camada era próxima dos 100 mm optou-se por cortar os carotes realizados com uma coroa de 150 mm em dois. Assim de cada carote foram extraídos dois provetes para o ensaio.

O ensaio finaliza após a aplicação de 5000 ciclos de carga, deste modo a duração total do ensaio é ligeiramente inferior a 1 hora. A temperatura de ensaio utilizada foi igualmente de 45°C. Foram ensaiados dois provetes por percentagem em betume para a série realizada em laboratório e para a série recolhida em obra.

## **RESULTADOS**

### **Ensaio de Wheel-Tracking**

Na pré-norma prEN 12697-22 para efectuar a análise dos resultados são propostos vários parâmetros. Os mais importantes para a caracterização à deformação permanente são a profundidade média da rodeira no final do ensaio, RDm, e a velocidade de deformação, TRm, obtida na fase linear da curva de deformação. Optou-se por determinar a velocidade de deformação entre o minuto 30 e o minuto 45, em todos os ensaios verificou-se que este intervalo se situava na parte linear da curva de deformação.

Pode observar-se na Figura 2 que os provetes com menor percentagem de betume sofreram menores deformações e apresentam velocidades de deformação inferiores. Deste modo, os dois parâmetros ofereceram igual caracterização das misturas. No entanto, a velocidade de deformação permite obter uma classificação mais clara. Outra vantagem deste parâmetro é ser menos susceptível à porosidade inicial pois a sua determinação é realizada com os dados da fase linear da curva após se ter realizado a pós-compactação da fase inicial.

A seriação dos provetes de obra é coincidente com a de laboratório, no entanto contrariamente ao esperado os provetes de obra obtiveram piores resultados que os de laboratório. A formulação das misturas apenas diferia à priori na classe de betume, utilizando-se em obra um betume mais duro. O melhor comportamento dos provetes de laboratório pode dever-se a um maior controlo e rigor no fabrico destes, nomeadamente, no controlo da granulometria e da homogeneidade dos provetes. O ensaio apresenta capacidade de caracterizar e diferenciar o comportamento das misturas à deformação permanente.

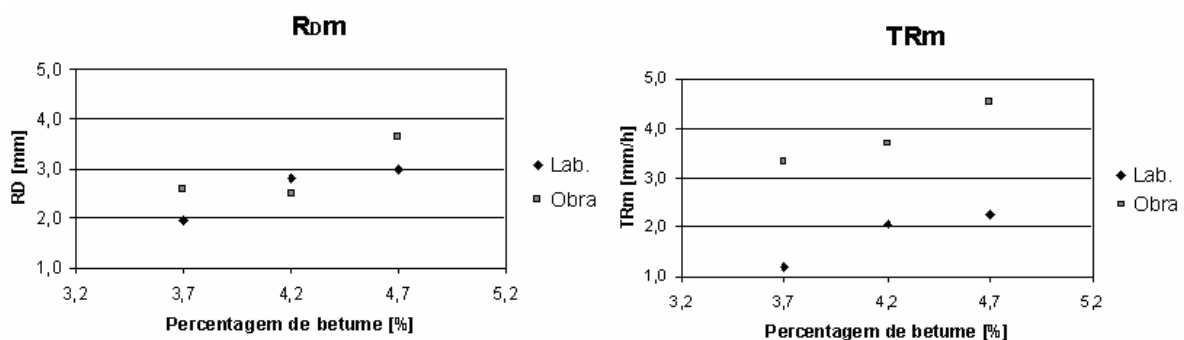


Figura 2. Resultados do ensaio de Wheel-Tracking.

### Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico

Deste ensaio podem retirar-se diversos parâmetros para caracterizar a mistura à deformação permanente. No entanto, de modo a efectuar a comparação com os resultados dos outros ensaios, foram determinados os parâmetros para os quais pode ser efectuada uma correspondência, nesse sentido determinou-se a extensão axial permanente total no ensaio,  $\epsilon_{3600}$ , e a velocidade de deformação,  $f$ . A velocidade de deformação foi determinada na parte linear da curva de deformação entre os ciclos 2000 e 3600. Na Figura 3 podem observar-se graficamente estes valores.

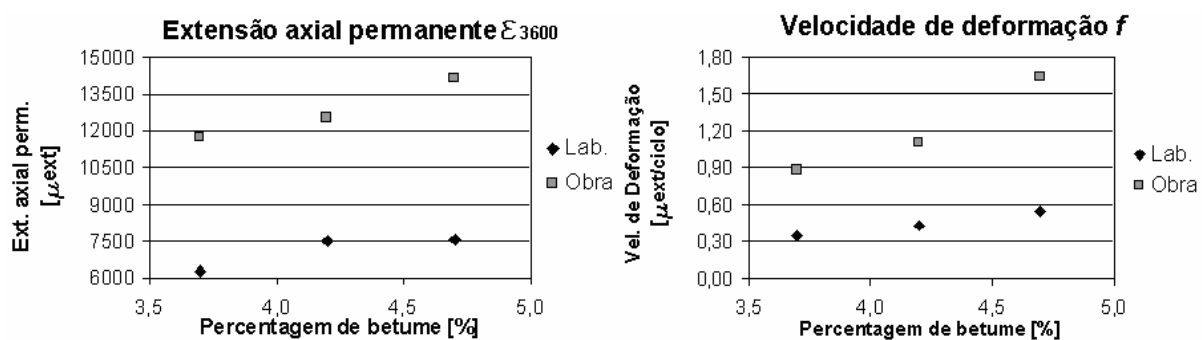


Figura 3. Resultados do ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico.

Os resultados obtidos no ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico são análogos aos do ensaio de Wheel-Tracking, isto é, tanto nos provetes de laboratório como nos de obra observa-se que para maiores percentagens de betume obtiveram-se resistências à deformação permanente inferiores. Verifica-se que extensão axial permanente e a velocidade de deformação obtiveram a classificação esperada das misturas de forma nítida. Neste ensaio os provetes de laboratório apresentaram melhor resistência que os de obra o que se pode dever às mesmas razões referidas no ensaio de Wheel-Tracking. Neste ensaio também a diferença existente entre os processos de compactação em laboratório e em obra poderá ter contribuído para este resultado (Khan *et al*, 1998). O ensaio apresenta uma boa sensibilidade permitindo diferenciar o comportamento das misturas.

### Ensaio de Compressão Triaxial Cíclico

A pré-norma indica diversos parâmetros que se podem determinar, no entanto apenas se apresentam aqueles susceptíveis de serem comparados com os restantes ensaios. Estes são extensão permanente axial total,  $\epsilon_{3600}$ , e a velocidade de deformação,  $f$ , obtidos no ensaio de Compressão Triaxial Cíclico. Estes parâmetros têm o mesmo significado e foram determinados de forma análoga aos do ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico. Os resultados do ensaio apresentam-se na Figura 4.

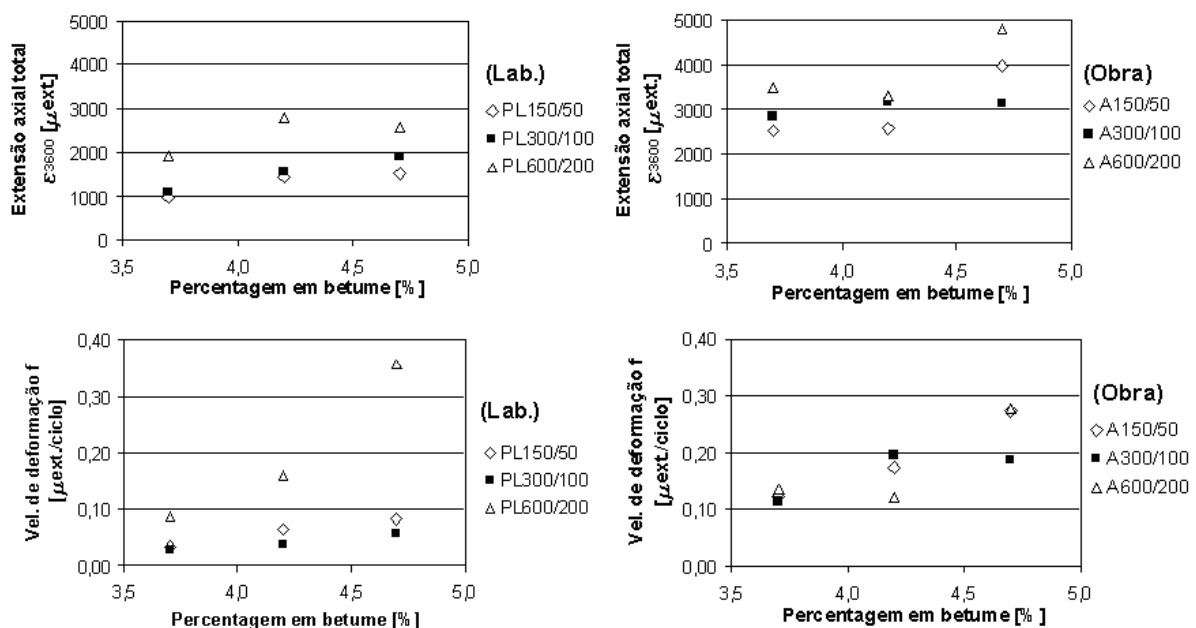


Figura 4. Resultados do ensaio de Compressão Triaxial Cíclico.

Pode observar-se na Figura 4 que a velocidade de deformação aumentou com o aumento da percentagem em betume e com o aumento do nível de tensão. De forma geral as classificações obtidas são difusas principalmente para os provetes recolhidos em obra. Nos provetes de laboratório estas tendências são mais nítidas obtendo-se uma ordenação de misturas evidente. A velocidade de deformação fornece bons resultados, demonstrando potencial para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. Analisando os níveis de tensão utilizados observa-se que nenhum deles se destaca por oferecer classificações mais nítidas.

## Ensaio de Corte a Altura Constante (RSST-CH)

Para este ensaio determinou-se igualmente a extensão de corte permanente acumulada no final do ensaio e a velocidade de deformação. Para este ensaio os parâmetros geralmente utilizados são determinados após modelação matemática, no entanto neste trabalho a extensão de corte permanente acumulada utilizada é a efectivamente medida no final do ensaio. Apesar de não ser corrente a utilização da velocidade de deformação esta determinou-se por analogia com os restantes ensaios, no sentido de comparar parâmetros que apresentem significados físicos semelhantes. Deste modo, foi determinada a velocidade de deformação dos provetes entre os ciclos 3000 e 5000.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de Corte a Altura Constante. Estes permitem concluir que este ensaio tem a capacidade de caracterizar misturas betuminosas à deformação permanente, mostrando uma boa sensibilidade. A seriação de misturas foi a esperada para a série de laboratório e de obra. Neste ensaio os provetes recolhidos em obra apresentaram uma resistência à deformação permanente superior, o que era o resultado esperado. A velocidade de deformação, embora não seja um parâmetro habitualmente utilizado, apresenta-se como um parâmetro interessante para a classificação de misturas à deformação permanente neste ensaio.

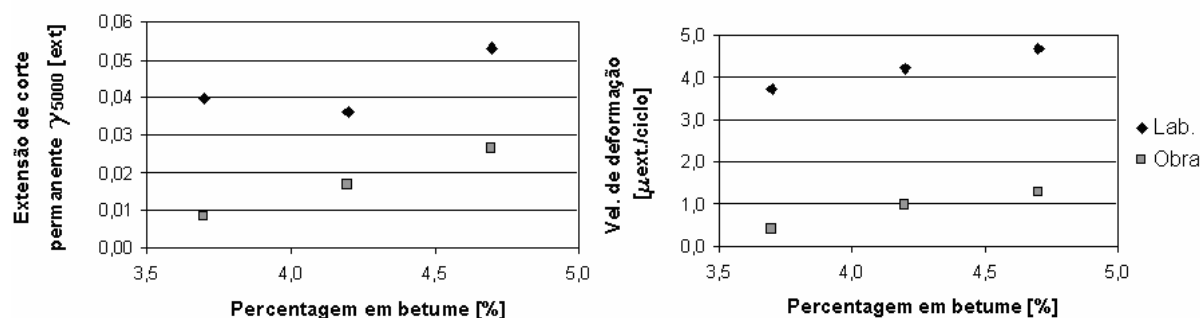


Figura 5. Resultados do ensaio de Corte a Altura Constante.

## Comparação de Resultados

Como forma de comparar os resultados optou-se por utilizar como referência os resultados do ensaio de Wheel-Tacking. Esta opção tem como justificação o facto dos resultados obtidos com este ensaio serem satisfatórios, é frequentemente usado na prática tecnológica de muitos países europeus e simula melhor o comportamento real, sobretudo na forma como o estado de tensão é induzido.

A comparação de resultados entre os diversos ensaios mostra existirem boas correlações quando se comparam parâmetros similares, nomeadamente extensão/deformação permanente total e velocidade de deformação. As correlações mais elevadas com os resultados do ensaio de Wheel-Tacking foram obtidas para o ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico (Figura 6) e Triaxial Cíclico (Figura 7). As correlações obtidas entre os resultados do ensaio de Wheel-Tacking e o ensaio de Corte a Altura Constante apresentam valores dos coeficientes de correlação inferiores (Figura 8). Estas boas correlações indicam que a caracterização das misturas conseguida com os diferentes ensaios é semelhante pelo que a utilização de ensaios mais simples apresenta-se vantajosa, pois são menos onerosos e mais fáceis de realizar fornecendo resultados semelhantes aos mais complexos.

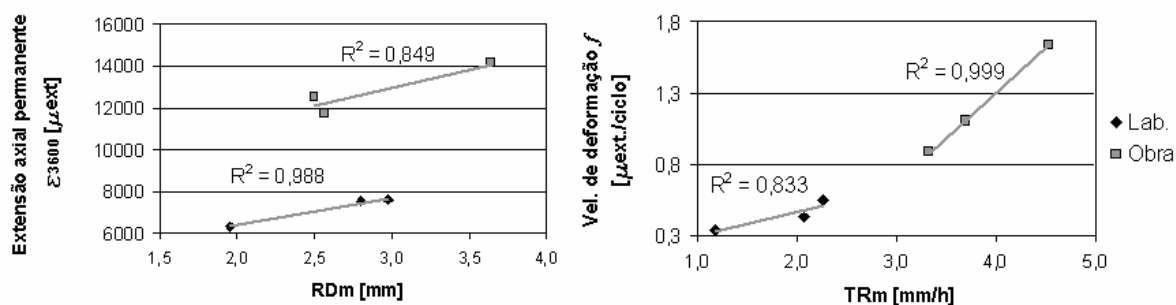


Figura 6. Comparação entre os resultados do ensaio de Wheel-Tracking e de Compressão Uniaxial Cíclico.

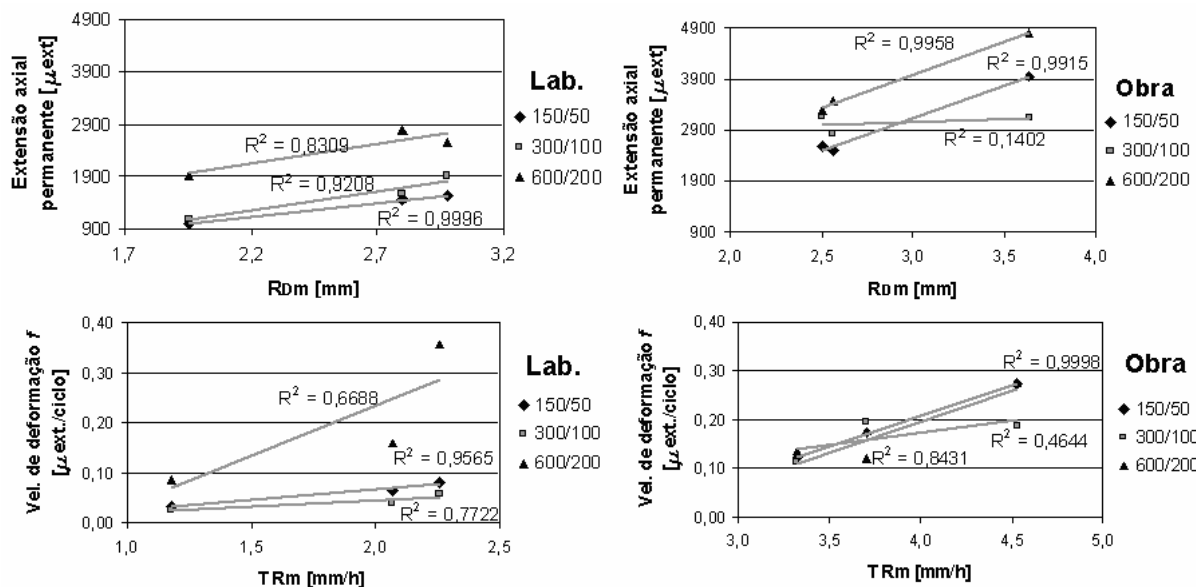


Figura 7. Comparação entre os resultados do ensaio de Wheel-Tracking e de Compressão Triaxial Cíclico.

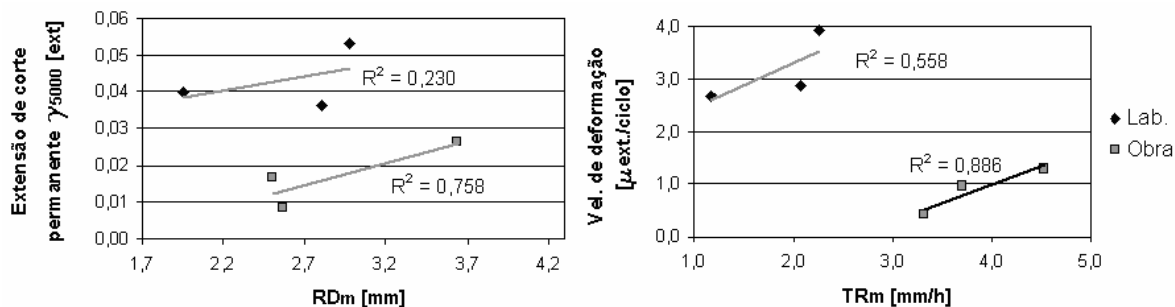


Figura 8. Comparação entre os resultados do ensaio de Wheel-Tracking e de Corte a Altura Constante.

No início dos ensaios de Wheel-Tracking, Compressão Uniaxial Cíclico e Triaxial Cíclico existe alguma densificação da mistura, esta fase é caracterizada por uma evolução não linear na curva de deformação. No entanto a velocidade de deformação é determinada na fase linear pelo que poderá ser um parâmetro mais fiável uma vez que é mais insensível fenómeno referido que a deformação/extensão total. Os bons resultados obtidos com a extensão axial permanente não são alheios a uma boa homogeneidade conseguida no fabrico dos provetes.

## CONCLUSÕES

O trabalho efectuado permite inferir as orientações expressas nos parágrafos seguintes.

Os ensaios utilizados permitiram obter no geral a mesma seriação de misturas com diferentes percentagens em betume, mostrando capacidade de caracterizar o comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente, embora este trabalho se tenha limitado a uma mistura tradicional.

O processo de fabrico, nomeadamente o processo de compactação, pode influenciar os resultados obtidos significativamente. Deste modo a caracterização relativa entre as séries de obra e de laboratório apenas foi a esperada no ensaio de Corte a Altura Constante.

Verificam-se boas correlações entre os resultados dos ensaios, nomeadamente quando se comparam parâmetros como a deformação/extensão total e a velocidade de deformação. Estas boas correlações indicam que utilização de ensaios mais simples apresenta-se vantajosa, pois são menos onerosos e mais fáceis de realizar, fornecendo resultados semelhantes aos mais complexos.

A velocidade de deformação apresenta-se como o parâmetro mais interessante para a caracterização à deformação permanente. É um parâmetro de simples compreensão e determinação oferecendo resultados fiáveis e robustos.

Numa apreciação para utilização em análise e controlo de qualidade na prática, o ensaio de Wheel-Tacking apresenta-se como o mais indicado, seguido pelo ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico. O ensaio de Wheel-Tacking apresenta a vantagem de poder ensaiar um maior leque de misturas betuminosas. O ensaio de Compressão Uniaxial Cíclico será mais interessante se puder ser realizado com o mesmo equipamento utilizado nos ensaios de fadiga e determinação da rigidez o que diminuirá os custos decorrentes da sua realização. O ensaio de Compressão Triaxial Cíclico apresenta procedimentos de ensaio mais complexos e é mais oneroso pelo que não parece ser indicado para uma utilização quotidiana. Embora de forma menos marcada o mesmo se passa com o ensaio de Corte a Altura Constante, acrescendo que não está prevista a sua utilização na prática tecnológica da generalidade dos países europeus.

## REFERÊNCIAS

AASHTO, Standard Test Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Test (SST), AASHTO TP7-01, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C. 2001

CEN, Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking, PrEN 12697-22, European Committee for Standardization, Brussels 2002

CEN, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test, PrEN 12697-25, European Committee for Standardization Brussels 2001

COST 333, Development of New Bituminous Pavement Design Method, Final Report of the Action, Directorate General Transport, Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg 1999

Freire A., Antunes M. & Picado-Santos, L., Characterization of Bituminous Mixtures for Numerical Modeling of Permanent Deformations, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 7 N.º 3, p. 87-102, 2006

JAE, Caderno de Encargos, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa 1998

Khan, A., Wahab, A., Asi, I. & Ramadhan, R., Comparative Study of Asphalt Concrete Laboratory Compaction Methods to Simulate Field Compaction, Construction and Building Materials vol. 12 p. 373-384, 1998

Picado-Santos, L., Design Temperature on Flexible Pavements: Methodology for Calculation, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 1, N.º 3 p. 355-371, 2000

TRB, SUPERPAVE – Performance by Design - Final Report of the TRB Superpave Committee, Transportation Research Board, Washington D.C. 2005