

# **CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS À DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM LABORATÓRIO**

DINIS GARDETE

*ASSISTENTE EST-IPCB, EST-IPCB, CASTELO BRANCO*

LUÍS PICADO-SANTOS

*PROFESSOR ASSOCIADO COM AGREGAÇÃO DEC-FCTUC, COIMBRA*

## **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. A introdução de novos métodos de avaliação do desempenho de misturas betuminosas à deformação permanente apresenta-se como um imperativo. As normas europeias já incluem ensaios laboratoriais com esse objectivo, como sejam, o ensaio de wheel tracking e os ensaios de compressão uniaxial cíclico e triaxial cíclico. Neste trabalho, faz-se a comparação dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais referidos anteriormente com o ensaio de corte a altura constante. Os diferentes ensaios apresentam resultados similares, boa sensibilidade e potencial para uma utilização em Portugal. A utilização de ensaios mais simples é vantajosa, pois permite obter resultados de qualidade análoga utilizando ensaios mais acessíveis.

## **1. INTRODUÇÃO**

A deformação permanente de misturas betuminosas é uma patologia de pavimentos flexíveis para a qual ainda não existem metodologias específicas implementadas que permitam evitar o seu aparecimento. Em Portugal, as temperaturas altas registadas no Verão, o aumento das cargas dos veículos pesados e da pressão de enchimento dos pneus constituem factores favoráveis ao aparecimento desta anomalia, prevendo-se que os insucessos relacionados com a deformação permanente das misturas betuminosas tenderão a agravar-se [1]. A avaliação da susceptibilidade das misturas betuminosas a esta patologia tem sido realizada recorrendo a 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 (RSCH), este tem sido pouco utilizado na tecnologia portuguesa, embora exista capacidade de o executar em instituições portuguesas.

A implementação destes ensaios revela-se de elevado interesse mas existem ainda alguns obstáculos que devem ser vencidos, nomeadamente definir procedimentos e condições de ensaio e definir valores limites para os resultados. Acrescenta-se ainda o facto de não ser interessante integrar no mercado ensaios diferentes cujo objectivo é único. Assim, torna-se importante comparar os ensaios e os seus resultados tendo em vista factores como a sua facilidade de realização, aquisição de equipamento, adequação à prática corrente no país. Outro aspecto importante de avaliar é verificar se os ensaios 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.

## 2. TRABALHO EXPERIMENTAL

Foram ensaiados provetes executados em laboratório e provetes recolhidos de trechos experimentais realizados com equipamento de construção. A mistura seleccionada para a realização do estudo foi um macadame com uma granulometria que respeita o fuso A do CE. Foram utilizadas percentagens em betume (Pb) de 3,7%, 4,2% e 4,7% para variar a susceptibilidade da mistura à deformação permanente e assim poder comparar os resultados dos diversos ensaios em termos de classificação relativa das misturas. Esta variação permitiu também analisar a sensibilidade dos ensaios.

As misturas betuminosas realizadas em laboratório e nos troços experimentais seguiram a mesma curva granulométrica (Figura 1). Utilizaram-se agregados de natureza calcária. O betume utilizado na realização das misturas em laboratório foi um betume 50/70. No entanto, para realização dos troços experimentais o betume utilizado foi da classe 35/50.

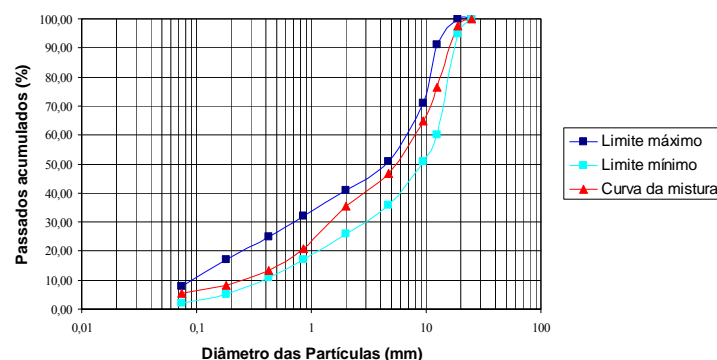


Figura 1 - Curva granulométrica da mistura e fuso granulométrico

## **2.1 Ensaio de Wheel Tracking**

O equipamento de wheel tracking utilizado enquadra-se nos equipamentos de pequena dimensão, *Small size device model A* [2]. 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 [2]. 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 de 350x350 mm tendo sido depois cortados com uma serra circular de forma a apresentarem as dimensões exigidas para prEN 12697-22 de 305x305mm. Foram ensaiados 6 provetes em laboratório (2 por percentagem em betume) e 9 provetes recolhidos *in situ* (3 por percentagem em betume).

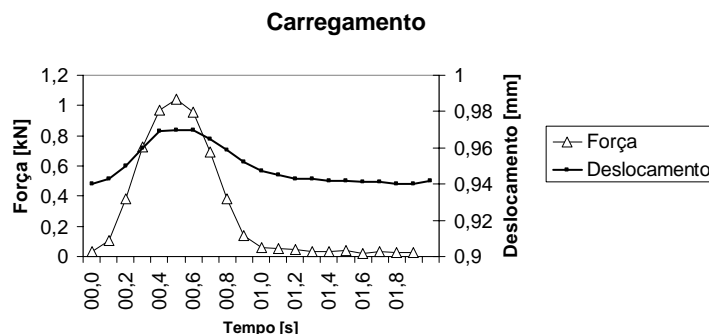
Os ensaios têm a duração de 45 minutos, com uma frequência de 21 ciclos por minuto (cada ciclo corresponde a duas passagens da roda.. A temperatura de ensaio foi de 45°C, que se julga ser uma temperatura representativa das condições de serviço deste tipo de misturas betuminosas em Portugal. Esta temperatura foi utilizada em todos os ensaios, obtendo-se deste modo uma caracterização do comportamento da mistura nos diferentes ensaios para condições semelhantes.

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

O procedimento utilizado para a realização do ensaio é o descrito na prEN 12697-25a [3]. 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, desta forma os provetes foram carotados com o seu diâmetro final. Foram ensaiados 4 provetes por percentagem em betume para a série de laboratório e dois provetes por percentagem em betume para a série recolhida *in situ*.

A temperatura de ensaio utilizada foi de 45°C. Adoptou-se um carregamento sinusoidal com uma tensão máxima de 150 kPa, com tempos de carregamento e de repouso de 1 segundo (Figura 2). Os ensaios tiveram uma duração de 3600 ciclos.



**Figura 2 - Carregamento e resposta no ensaio de compressão uniaxial cíclico**

### 2.3 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 [3]. Os processos para a realização dos provetes triaxiais em laboratório foram análogos aos utilizados para a realização dos provetes destinados ao ensaio de compressão uniaxial cíclico. 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. O carregamento adoptado foi semelhante ao utilizado no ensaio de compressão uniaxial cíclico, bem como a duração e a temperatura de ensaio.

A pré-norma não especifica com exactidão os níveis de tensão a utilizar para a realização do ensaio, desta forma, optou-se por se utilizar três níveis de tensão dentro dos intervalos indicados, tanto para a tensão máxima como para a tensão de confinamento. Adoptou-se um nível de tensão baixo, um nível de tensão elevado e um nível de tensão intermédio considerando os intervalos indicados na prEN 12697-25 para a tensão máxima axial e de confinamento (Quadro 1).

**Quadro 1- Níveis de tensão utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclico.**

Nível de tensão	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Tensão axial máxima $\sigma_1$ [kPa]	150	300	600
Tensão de confinamento $\sigma_3$ [kPa]	50	100	200
Tensão desviante $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ [kPa]	100	200	400

### 2.3 Ensaio de Corte a Altura Constante

Como referido anteriormente este ensaio teve origem nos EUA no âmbito do programa SUPERPAVE do SHRP. Este ensaio foi realizado de acordo com procedimento AASHTO TP7-01 [4] utilizando o equipamento do DEC da Universidade do Minho. Neste ensaio são aplicadas

tensões de corte aos provetes, a tensão de corte aplicada é cíclica e solicita o provete sempre na mesma direcção. Os provetes têm as dimensões de 50 mm de altura e 150 mm de diâmetro.

Foi assim compactada uma laje com 50 mm de altura e depois foram carotados dessa laje os provetes com 150 mm de diâmetro. A compactação foi realizada utilizando um pequeno cilindro de rolos vibratórios. Os provetes de obra foram carotados nos troços com coroa de 150 mm. Como a espessura da camada era próxima dos 100 mm optou-se por cortar os carotes realizados em dois. Assim de cada carote foram extraídos dois provetes.

O carregamento de ensaio segue uma forma sinusoidal com repouso. Cada ciclo de carregamento tem um tempo de carga com duração de 0,1 segundos seguindo-se um tempo de repouso com a duração de 0,6 segundos. A tensão de corte aplicada é de 69 kPa. O ensaio finaliza após a aplicação de 5000 ciclos de carga. 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 *in situ*.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Ensaio de Wheel-Tracking

Na pré-norma prEN 12697-22 para efectuar a análise dos resultados são propostos vários parâmetros. Os mais utilizados são a profundidade média da rodeira no final do ensaio  $R_{DM}$ , e a velocidade de deformação  $TR_m$  obtida na fase linear da curva de deformação (Figura 3)

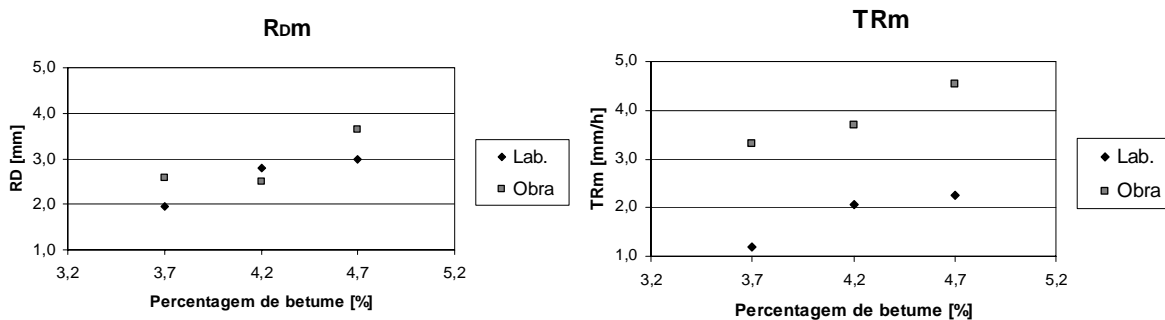


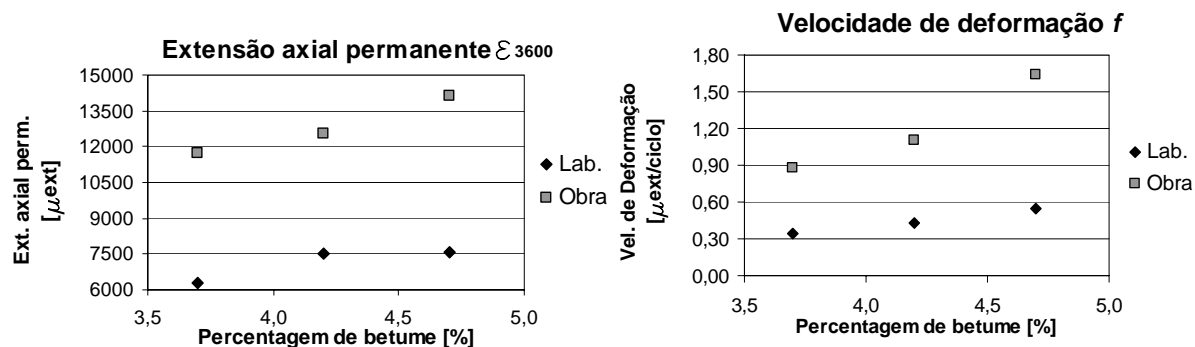
Figura 3 – Resultados do ensaio de wheel tracking.

Pode observar-se que os provetes com menor percentagem de betume sofreram menores deformações e apresentam velocidades de deformação inferiores. O ensaio apresenta capacidade de caracterizar e diferenciar o comportamento das misturas à deformação permanente. A velocidade de deformação permite obter uma classificação mais clara.

A seriação dos provetes de obra e de laboratório é coincidente, 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.

### 3.2. 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 de outros ensaio os parâmetros para os quais pode ser efectuada uma correspondência são a extensão axial permanente e a velocidade de deformação. Na Figura 4 podem observar-se graficamente estes valores.



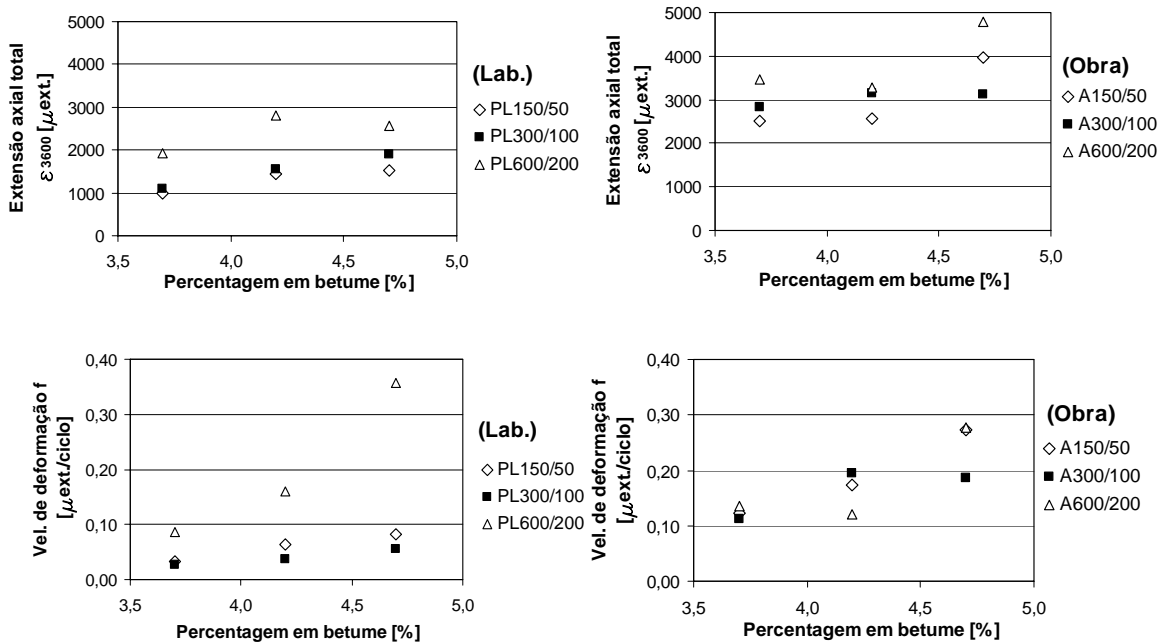
**Figura 4 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial cíclico.**

Os resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial cíclico são análogos aos 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. Os provetes de laboratório apresentaram melhores resistência que os de obra.

O ensaio apresenta uma boa sensibilidade conseguindo diferenciar o comportamento das misturas. A extensão permanente total e a velocidade de deformação apresentam bons resultados, obtendo-se a classificação esperada e de forma nítida.

### 3.3. 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 e a velocidade de deformação obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclico (Figura 5)



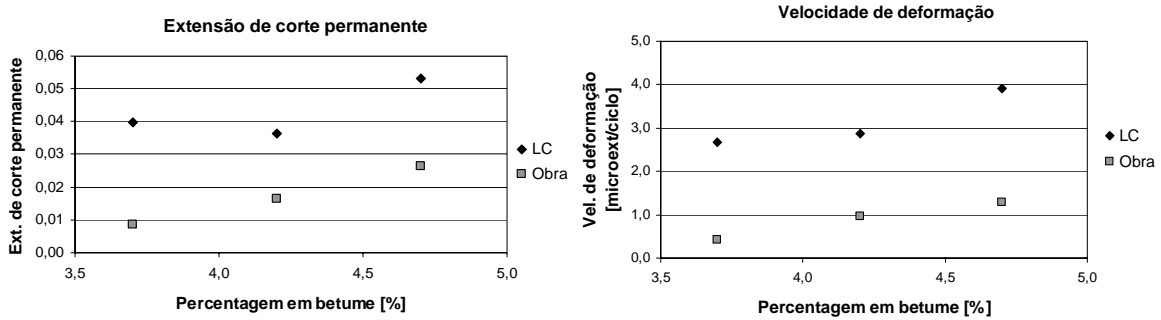
**Figura 5 – Resultados do ensaio de compressão triaxial cíclico**

Pode observar-se 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 *in situ*. 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.

### 3.4 Ensaio de Corte a Altura Constante (RSCH)

Para este ensaio determinou-se igualmente a extensão de corte permanente e a velocidade de deformação (Figura 6). Apesar de não ser corrente a determinação da velocidade de deformação esta determinou-se por analogia com os restantes ensaios. Assim, foi determinada a velocidade de deformação dos provetes entre os ciclos 3000 e 5000.

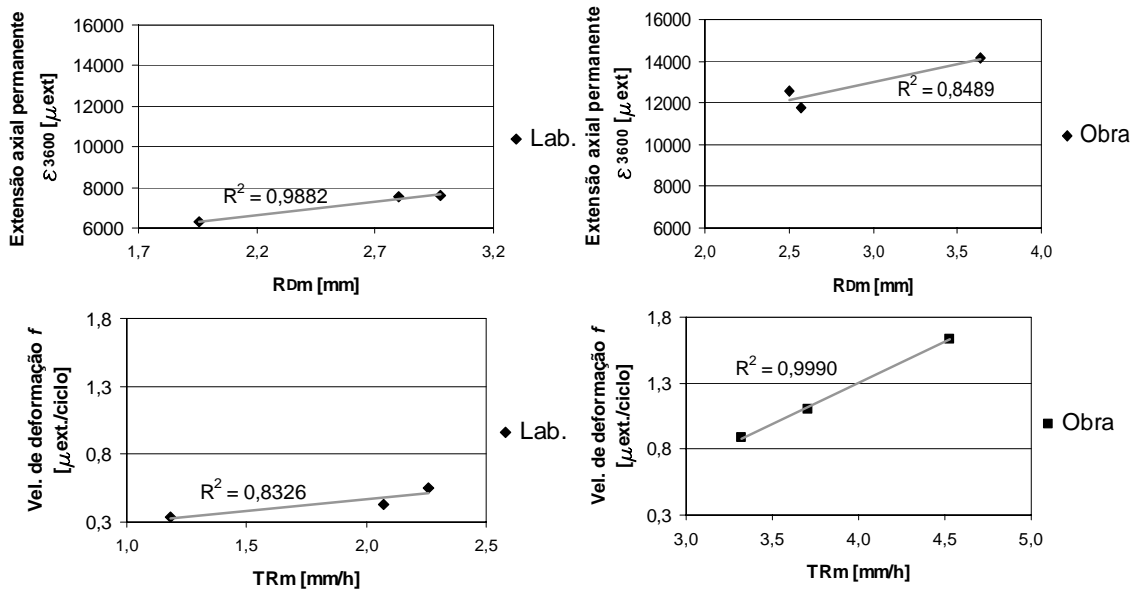
Os resultados obtidos no ensaio de corte a altura constante permitem concluir que este ensaio tem a capacidade de caracterizar misturas betuminosas à deformação permanente, mostrando uma boa sensibilidade. A seriação de misturas foi a esperada para a série de laboratório de obra. Neste ensaio os provetes recolhidos *in situ* apresentaram uma resistência à deformação permanente superior. A velocidade de deformação, embora não seja um parâmetro habitualmente utilizado, apresenta-se como um bom parâmetro para a classificação de misturas à deformação permanente



**Figura 6 – Resultados do ensaio de corte a altura constante**

### 3.5 Comparação de Resultados

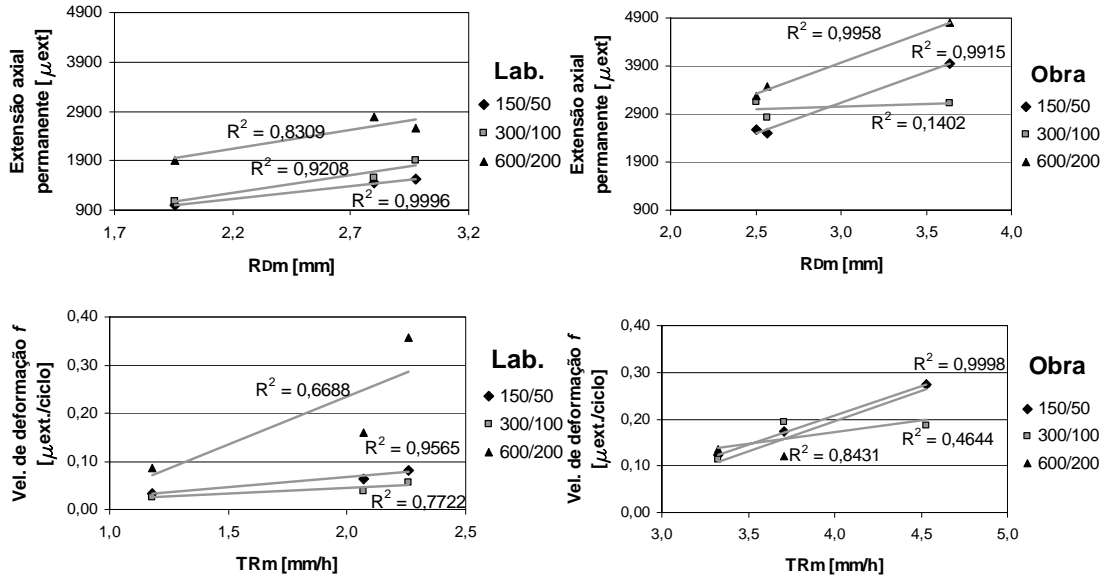
Como forma de comparar os resultados optou-se por utilizar como referência os resultados do ensaio de wheel tracking (Figura 7, Figura 8 e Figura 9). Esta opção tem como justificação o facto dos resultados obtidos com este ensaio serem satisfatórios, é frequentemente usado na prática tecnológica de muitos países europeus, e simula melhor o comportamento real, sobretudo na forma como o estado de tensão é induzido.



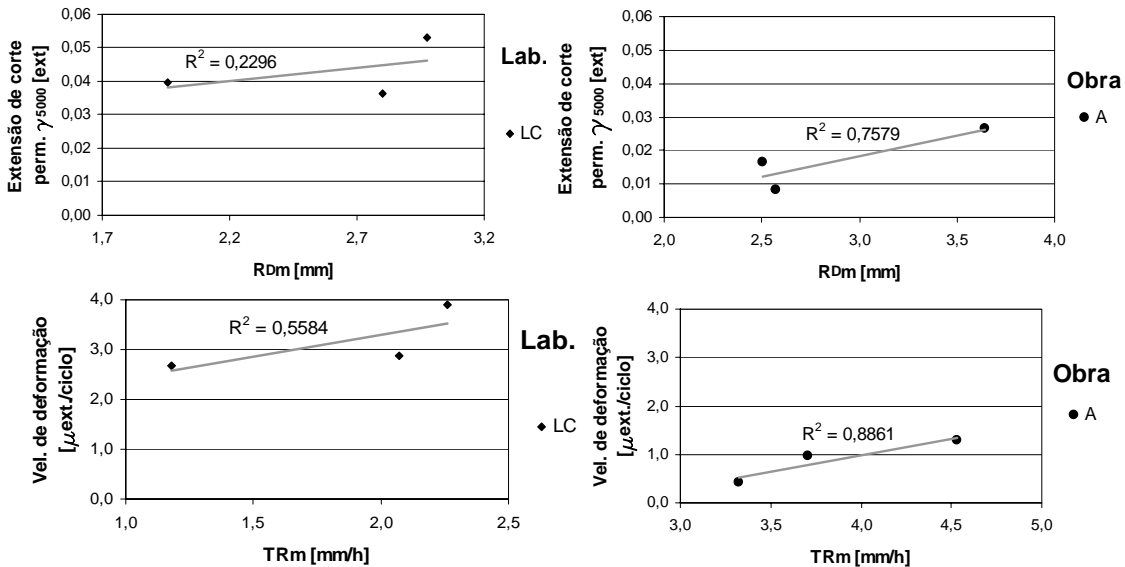
**Figura 7 – Comparação entre os resultados do ensaio de wheel tracking e do ensaio de compressão uniaxial cíclico**

A comparação de resultados entre os diversos ensaios mostra existirem boas correlações para os parâmetros extensão permanente total e velocidade de deformação. As correlações mais elevadas com os valores obtidos no ensaio de wheel tracking obtêm-se para o ensaio de compressão uniaxial cíclico e triaxial cíclico. As correlações obtidas entre os resultados do ensaio de wheel

tracking e o ensaio de corte a altura constante apresenta valores do coeficiente de correlação inferiores. 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.



**Figura 8 – Comparação entre os resultados do ensaio de wheel tracking e do ensaio de compressão triaxial cíclico**



**Figura 9 – Comparação entre os resultados do ensaio de wheel tracking e do ensaio de corte a altura constante**

No início dos ensaios de wheel tracking, compressão uniaxial cíclico e triaxial cíclico existe alguma densificação da mistura, pelo que, a velocidade de deformação poderá ser um parâmetro

mais fiável uma vez que é insensível a este fenómeno. Os bons resultados obtidos com a extensão axial permanente não são alheios a uma boa homogeneidade conseguida no fabrico dos provetes.

#### **4 CONCLUSÕES**

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

Verificam-se boas correlações entre os resultados dos ensaios, nomeadamente para 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. È 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 tracking apresenta-se como o mais indicado, seguido pelo ensaio de compressão uniaxial cíclico. Este último ensaio é ainda mais interessante se puder ser realizado com o equipamento utilizado nos ensaios de fadiga. 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. O mesmo se passa com o ensaio de corte a altura constante, acrescentando que não está prevista a sua utilização na prática tecnológica da generalidade dos países europeus.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] - COST 333. - “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.

[2] - CEN - “Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking”. *PrEN 12697-22*, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.

[3] - CEN - “Bituminous mixtures – Test methods for mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test”. *PrEN 12697-25*, European Committee for Standardization, Brussels, 2001.

[4] – 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, USA, 2001.