

# **ENSAIOS PARA DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS BETUMINOSAS: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE WHEEL TRACKING E FLUÊNCIA DINÂMICA.**

DINIS GARDETE

ASSISTENTE EST-IPCB, EST-IPCB, CASTELO BRANCO

LUÍS PICADO-SANTOS

PROFESSOR AUXILIAR COM AGREGAÇÃO DEC-FCTUC, COIMBRA

JORGE C. PAIS

PROFESSOR AUXILIAR DEC-UM, GUIMARÃES

## **RESUMO**

A deformação permanente em misturas betuminosas é uma degradação de pavimentos rodoviários frequente mas para a qual ainda não existe uma metodologia que possa de forma cabal prever a sua evolução, nomeadamente para as camadas betuminosas. Para avaliar a susceptibilidade destas à deformação permanente existem vários ensaios laboratoriais, como sejam, o ensaio de Wheel Tracking e o de Fluência Dinâmica. Neste trabalho faz-se a comparação dos resultados obtidos para uma mistura betuminosa comum em Portugal com os ensaios laboratoriais de Wheel Tracking e de Fluência Dinâmica realizados, respectivamente, de acordo com a prEN 12697-22 e a prEN 12697-25. Foram ensaiados provetes produzidos em laboratório e recolhidos em obra. Os resultados obtidos confirmam a aplicabilidade dos ensaios e ainda que o parâmetro velocidade de deformação pode ser utilizado na caracterização do comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente.

## **1. INTRODUÇÃO**

A deformação permanente em misturas betuminosas é uma degradação de pavimentos rodoviários frequente mas para a qual ainda hoje não existem aplicadas metodologias que de uma forma cabal possam prevenir o aparecimento deste género de anomalias em pavimentos flexíveis. Em Portugal, com 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]. É assim fundamental conseguir avaliar a susceptibilidade das misturas betuminosas à deformação permanente.

Nesta linha de pensamento foram aparecendo vários ensaios para esse fim, como sejam, o ensaio de Fluência Dinâmica, o ensaio Triaxial Cíclico, o ensaio de Corte a Altura Constante e o ensaio de Wheel Tracking [2].

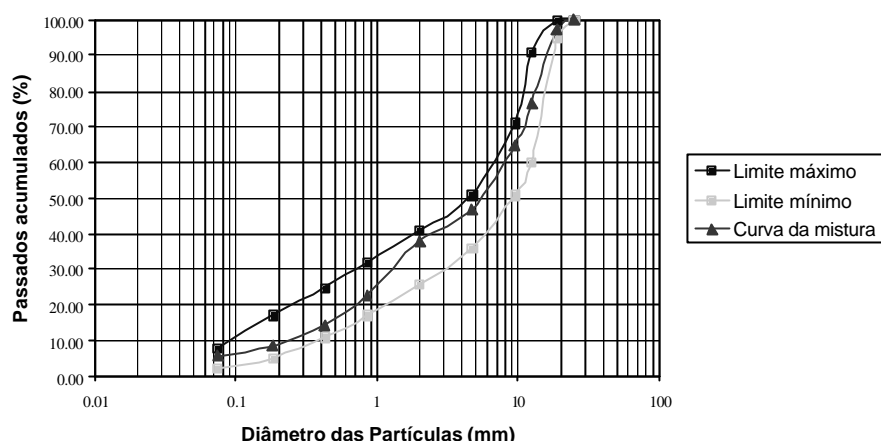
A implementação destes ensaios revela-se de elevado interesse mas existem ainda alguns obstáculos, nomeadamente a definição de procedimentos e condições de ensaio e a definição de valores-limite para os resultados. Acrescenta-se ainda o facto de não ser interessante do ponto de vista da uniformidade de procedimentos e inferências usar na prática corrente ensaios diferentes cujo objectivo é único. Assim, torna-se importante comparar os ensaios e os seus resultados tendo em vista factores como a facilidade de realização, de aquisição do equipamento, de adequação à prática corrente no país, se os ensaios cumprem com os fins a que se destinam e verificar 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.

Verifica-se que apesar das diferenças entre os ensaios como o Wheel Tracking e o de Fluência Dinâmica, os dois serão previsivelmente, os que têm maiores possibilidades de implementação no meio técnico para este fim, devido ao preço do equipamento e simplicidade do ensaio, quando comparados com, por exemplo, ensaios como o Triaxial e como o de Corte a Altura Constante.

## **2. TRABALHO EXPERIMENTAL**

A mistura betuminosa estudada, através de provetes executados em laboratório e de provetes recolhidos de trechos experimentais realizados com equipamento de construção, foi um macadame com uma granulometria que respeita o fuso A do CEIEP [3]. 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, mas também analisar a sensibilidade dos ensaios a esta variação para as condições definidas nas pré-normas europeias prEN 12697-22 [4] e prEN 12697-25 [5], no que respeita ao ensaio de Wheel Tracking e ao ensaio de Fluência Dinâmica.

A curva granulométrica da mistura é apresentada na Figura 1, na qual também se representam os limites que ela deve cumprir de acordo com o CEIEP [3]. O agregado utilizado é de origem calcária. O betume utilizado no fabrico dos provetes de laboratório foi um betume de classe 50/70 e nos trechos experimentais foi utilizado um betume 35/50 no fabrico da mistura betuminosa.



**Figura 1: Curva granulométrica da mistura betuminosa e limites impostos (CEIEP [3]).**

Para o ensaio de Wheel Tracking foi utilizado um equipamento pequeno modelo A (*small size device model A* [4]), em que o acondicionamento do provete à temperatura do ensaio é realizado através de ar. Os provetes utilizados foram lajes com dimensões de 305x305x80 mm. Os provetes de Wheel-Tracking de laboratório foram compactados utilizando um pequeno cilindro de rolos. Em obra os provetes foram serrados num troço experimental realizado com o equipamento normal de compactação e foram depois rectificadas de forma a ficarem com as dimensões correctas de ensaio. As características destes provetes podem ser verificadas no Quadro 1.

**Quadro 1: Características dos provetes de Wheel-Tracking**

Laje	Origem	Pb	Baridade ( $\text{g/cm}^3$ )	Dimensões (mm)
L2	Laboratório	4,2 %	2,355	306*305*84
L7	Laboratório	4,2 %	2,383	307*303*82
L3	Laboratório	4,7 %	2,374	308*308*83
L4	Laboratório	4,7 %	2,393	305*307*82
L5	Laboratório	3,7 %	2,398	307*308*82
L6	Laboratório	3,7 %	2,387	308*306*82
LA12	Obra	3,7 %	2,348	299*299*73
LA15	Obra	3,7 %	2,339	299*299*78
LA16	Obra	3,7 %	2,346	299*299*79
LA21	Obra	4,2 %	2,364	299*299*76
LA22	Obra	4,2 %	2,398	299*298*72
LA24	Obra	4,2 %	2,402	299*298*80
LA33	Obra	4,7 %	2,390	300*299*78
LA35	Obra	4,7 %	2,396	299*299*77
LA36	Obra	4,7 %	2,399	299*299*76

Os ensaios têm a duração de 45 minutos, com uma frequência de 21 ciclos por minuto (cada ciclo corresponde a duas passagens da roda [4]). A face de ensaio foi a contrária à da compactação para todos os provetes. Para realização do ensaio optou-se por um valor de temperatura de ensaio de 45 °C, valor aconselhado para a zona temperada em Portugal [6]. Desta forma foram ensaiados 6 provetes em laboratório e recolhidos 9 provetes em obra.

O ensaio de Fluência dinâmica é realizado em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os provetes realizados em laboratório foram compactados com um vibro-compactador tipo “Kango” (martelo vibro-compressor com placa cilíndrica no topo de diâmetro de 150 mm, colocado num suporte que permite a compactação de provetes cilíndricos). Os de obra foram carotados com uma coroa de 15 cm, após o que foram rectificadas de forma a ficarem com as faces lisas e paralelas. No Quadro 2 apresentam-se as características dos provetes ensaiados.

**Quadro 2: Características dos provetes de Fluência Dinâmica**

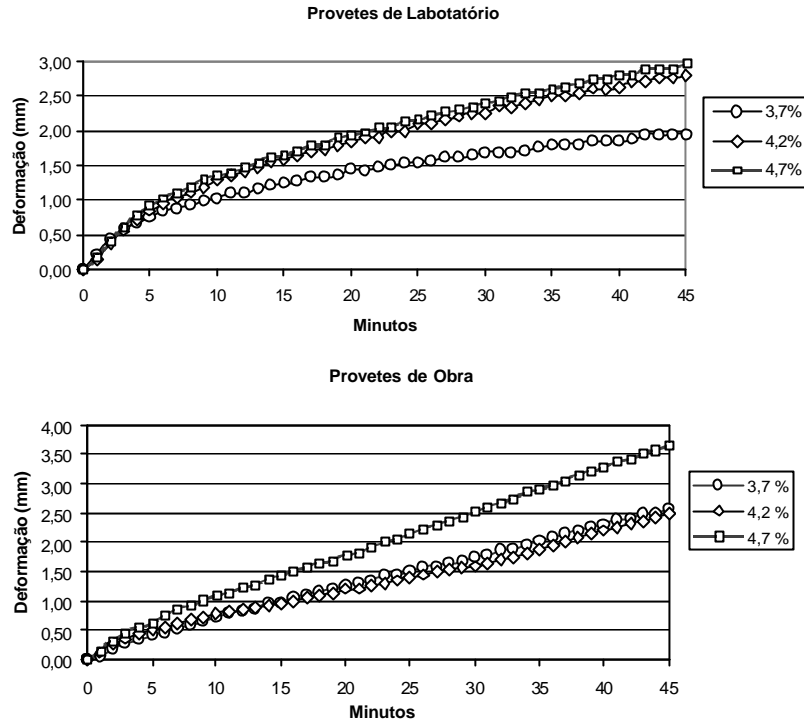
Proвете	Origem	Pb (%)	Baridade (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
PL15	Laboratório	3,7	2,376	152	102
PL16	Laboratório	3,7	2,395	152	102
PL17	Laboratório	3,7	2,364	152	102
PL2	Laboratório	4,2	2,417	152	100
PL3	Laboratório	4,2	2,417	152	93
PL4	Laboratório	4,2	2,421	152	91
PL5	Laboratório	4,2	2,443	152	89
PL20	Laboratório	4,7	2,421	152	95
PL9	Laboratório	4,7	2,409	152	93
PL11	Laboratório	4,7	2,372	152	99
PL10	Laboratório	4,7	2,419	152	95
A-1-1	Obra	3,7	2,389	151	86
A-1-2	Obra	3,7	2,362	151	82
A-2-1	Obra	4,2	2,395	152	88
A-2-2	Obra	4,2	2,420	152	91
A-3-1	Obra	4,7	2,390	152	107
A-3-2	Obra	4,7	2,426	152	96

O ensaio de fluência dinâmica foi realizado de acordo com a prEn 12967-25 (2001), optando-se por um carregamento sinusoidal com uma frequência de 2 Hz correspondendo a 1 segundo de carregamento e 1 segundo de repouso. A tensão máxima de carregamento foi de 150 Mpa. O ensaio tem a duração de 3600 ciclos e foi realizado com uma temperatura de 45 °C [6].

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Ensaio de Wheel-Tracking

O resultado deste ensaios são curvas que relacionam a deformação do provete na zona de passagem do rodado com o tempo de ensaio. Na Figura 2 mostram-se as curvas obtidas para os provetes ensaiados.



**Figura 2: Curvas de deformação média obtidas para as diferentes percentagens de betume.**

Na pré-norma prEN 12697-22 (1997) para efectuar a análise dos resultados são propostos vários parâmetros. No entanto, o que é mais sugestivo é a velocidade de deformação TR (*Wheel Tracking Rate*) em mm/h, de acordo aliás com o que é a tradicional interpretação dos resultados deste ensaio [4,6]. Determinou-se a velocidade de deformação na parte linear da curva, definida entre minuto 30 ao 45, obtendo-se os resultados do Quadro 3. Seguiu-se o mesmo processo em todos os provetes pois nenhum atingiu a rotura durante o ensaio.

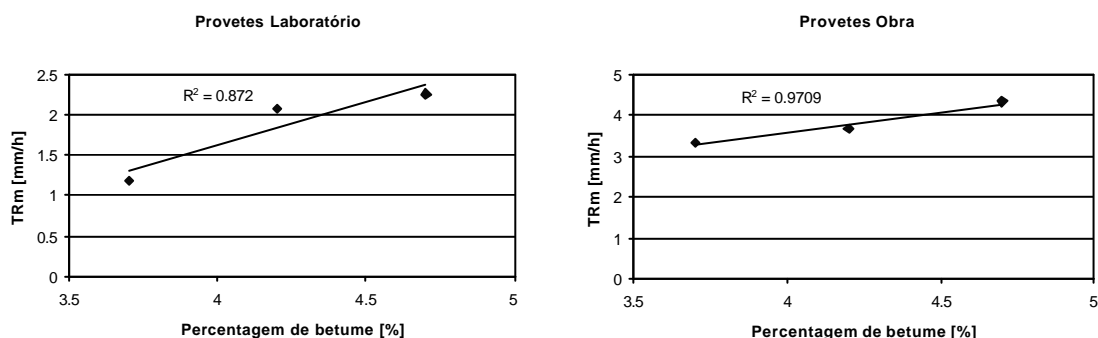
**Quadro 3: Velocidade de deformação (TRm) obtida nos ensaios de Wheel-Tracking.**

Lajes	Pb	d <sub>45</sub> (mm)	TR (mm/h)	TRm (mm/h)
L5	3,7	2,30	1,41	1,18
L6	3,7	1,61	0,95	
L2	4,2	3,19	2,37	2,07
L7	4,2	2,41	1,77	
L3	4,7	3,46	2,63	2,25
L4	4,7	2,49	1,89	
LA12	3,7	2,91	3,52	3,32
LA15	3,7	2,41	3,19	
LA16	3,7	2,39	3,26	
LA21	4,2	3,70	6,32	3,67
LA22	4,2	2,01	2,96	
LA24	4,2	1,80	1,84	
LA33	4,7	2,81	3,48	4,32
LA35	4,7	3,31	4,05	
LA36	4,7	4,80	6,06	

Os valores de correlação encontrados para o ajuste da curva também apresentados e são sempre elevados. Além deste valor apresenta-se o valor da deformação vertical total após o ensaio  $d_{45}$ .

Pode observar-se que as velocidades de deformação dos provetes de laboratório são mais baixas que no caso dos provetes de obra, mas mais importante em ambos os casos a seriação por percentagem em betume é igual, isto é, tanto para os provetes de laboratório como para os provetes de obra verifica-se que os realizados com percentagem em betume de 3,7 % são mais resistentes à deformação permanente enquanto os de percentagem em betume de 4,7 % são os que apresentam maior velocidade de deformação, e portanto menor resistência á deformação permanente. Para estas misturas quanto maior for a percentagem de betume maior é a velocidade de deformação.

Os provetes de 4,2 % recolhidos em obra apresentaram deformações inferiores aos de 3,7 %, apesar de na parte final da curva de deformação terem uma velocidade de deformação superior. No entanto, a série de provetes com percentagem em betume de 4,2% apresenta uma dispersão superior. Neste caso seria conveniente ter realizado, o que não foi possível, mais ensaios nesta série para se ter uma melhor percepção em termos estatísticos da curva de deformação para estes provetes. Para atenuar este facto a prEn 12697-22 [4] aconselha a realizar seis provetes por série. No entanto, este valor obriga a um esforço de produção de provetes em laboratório e de obtenção de provetes em obra que torna este ensaio menos interessante em termos de controle de qualidade, ficando apenas com funções de enquadramento da formulação de misturas no que respeita à análise à deformação permanente.



**Figura 2: Relação entre o valor de TRm e a percentagem em betume para os provetes de laboratório e de obra.**

Colocando num gráfico os valores da percentagem em betume dos provetes e a velocidade de deformação média (TRm) pode-se observar uma excelente correlação obtida realizando uma regressão linear, o que demonstra que de facto este parâmetro apresenta uma boa aptidão para comparar os resultados de séries de lajes com variação de teor em betume (Figura 3), no entanto serão necessários mais resultados para consolidar esta conclusão.

### 3.2. Ensaio de Fluência Dinâmica

As curvas de deformação obtidas para o ensaio de fluência dinâmica têm um andamento semelhante às que se obtiveram para o de Wheel-Tracking.

A prEN 12697-25 indica que se deve calcular a velocidade de deformação no ramo linear da curva de deformação, assim, optou-se por calcular a este parâmetro entre os ciclos 2000 e 3600, ou seja, na parte final do ensaio. Refira-se que este procedimento foi sempre efectuado uma vez que nenhum dos provetes atingiu a rotura durante o ensaio.

De forma a poder comparar os resultados dos dois ensaios determinou-se a deformação axial permanente e a velocidade de deformação, como efectuado nos resultados de Wheel-Tracking, não se apresentam os valores do módulo de fluência precisamente por não haver correspondência com o Wheel-Tracking.

Apresentam-se no Quadro 4 os resultados dos ensaios realizados nos provetes de laboratório. Na tabela está para além da velocidade de deformação, parâmetro considerado mais relevante, a deformação axial total do provete (ocorrida no pré-carregamento e no ensaio) e a deformação ocorrida no ensaio.

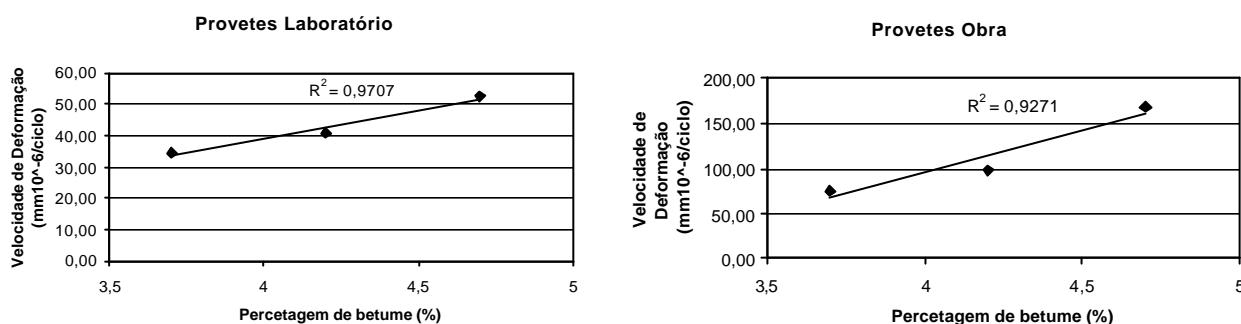
**Quadro 4: Velocidades de deformação obtidas no ensaio de Fluência Dinâmica.**

Provetes	Pb (%)	Deformação Total(mm)	Deformação no Ensaio (mm)	Velocidade de Deformação ( $\text{mm}10^{-6}/\text{ciclo}$ )	Velocidade de Deformação Média ( $\text{mm}10^{-6}/\text{ciclo}$ )
PL15	3,7	0,592	0,302	36,57	34,58
PL16	3,7	0,694	0,348	34,15	
PL17	3,7	0,643	0,346	33,02	
PL2	4,2	1,024	0,460	52,08	40,84
PL3	4,2	0,751	0,516	74,46	
PL4	4,2	0,721	0,291	29,01	
PL5	4,2	0,344	0,134	7,82	
PL20	4,7	1,065	0,383	31,51	
PL9	4,7	0,655	0,464	63,88	52,49
PL11	4,7	0,576	0,416	72,57	
PL10	4,7	0,602	0,337	41,99	
A-1-1	3,7	1,048	0,638	81,32	74,30
A-1-2	3,7	0,927	0,527	67,27	
A-2-1	4,2	1,216	0,701	95,93	98,47
A-2-2	4,2	1,031	0,712	101,00	
A-3-1	4,7	1,595	1,113	220,92	168,29
A-3-2	4,7	1,2845	0,715	115,66	

Foram efectuados mais ensaios por cada teor em betume para os provetes de laboratório pois estes apresentaram uma dispersão significativa, assim um maior número de ensaio permitiu

reduzir os inconvenientes dessa dispersão e permitindo consolidar os resultados obtidos. Assim efectuaram-se quatro para as percentagem em betume de 4,2% e 4,7%, onde a dispersão foi superior. Refira-se que a pré-norma refere que se devem utilizar cinco provetes por teor em betume, mais do que se ensaiaram neste trabalho. No entanto o facto de se terem que realizar cinco ensaios aumento o esforço necessário tornando menos interessante este ensaio. Parece no entanto que para a maioria dos casos não será necessário realizar cinco provetes para obter resultados satisfatórios.

Os resultados obtidos no ensaio de Fluência dinâmica são análogos aos de Wheel-Tracking, isto é, nos provetes de laboratório e nos de obra verifica-se que para maiores percentagens de betume se obtiveram maiores velocidades de deformação. Nos gráficos que relacionam os valores da velocidade de deformação média com a percentagem em betume obtêm-se valores elevados do coeficiente de correlação quando se efectua uma regressão linear.

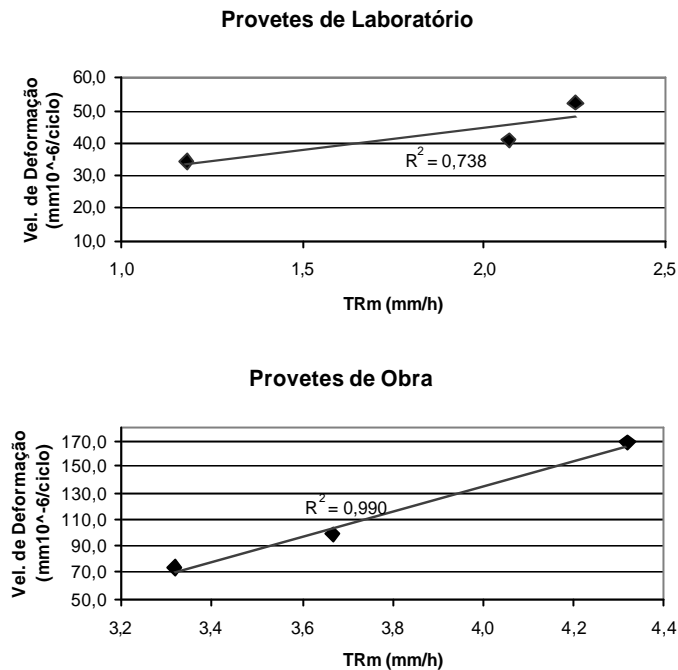


**Figura 4: Relação entre o valor da Velocidade de Deformação Média e a percentagem em betume para os provetes de laboratório e de obra.**

Realce para o facto de também neste ensaio se obterem maiores velocidades de deformação nos provetes de obra quando comparados com os provetes de laboratório.

### 3.3. Comparação de resultados

Analisando as velocidades de deformação obtidas nos ensaios observa-se que os resultados dão a mesma indicação, sendo essa semelhança mais evidente quando se observa num gráfico a relação entre a velocidade de deformação obtida no ensaio de Wheel-tracking (TRm) e a obtida no ensaio de Fluência Dinâmica (Figura 5).



**Figura 5: Relação entre o valor da Velocidade de Deformação Média obtida no ensaios de Wheel-Tracking e no de Fluência Dinâmica.**

#### 4. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados conclui-se que a velocidade de deformação obtida no ensaio de Wheel-Tracking ou no de Fluência Dinâmica é o parâmetro indicado para caracterizar a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas. Este parâmetro permite obter a mesma ordem nas misturas betuminosas quer em laboratório quer em obra, indicando que maiores quantidades de betume conduzem a maiores deformações permanentes, como esperado analisando este parâmetro observa-se que existe uma boa correlação dos resultados obtidos em ambos os ensaios.

Para as condições de ensaio que foram consideradas, os ensaios de Wheel-Tracking e Fluência Dinâmica permitem realizar a distinção entre misturas com diferentes teores em betume caracterizando a resistência destas à deformação permanente. Ambos os ensaios se mostram adequados para serem utilizados nesta caracterização.

Se for considerado que *à priori* as misturas utilizadas têm todas um nível de resistência aceitável à deformação permanente, devido à sua formulação e à experiência que existe na sua utilização corrente, verificamos que os ensaios apresentam uma boa sensibilidade.

Para ambos os ensaios, os valores obtidos para os provetes de laboratório apresentaram-se um pouco melhores do que os obtidos em obra. Para este facto pode ter contribuído um maior

controlo na execução dos provetes de laboratório. Até pela observação das baridades pode concluir-se que os provetes de laboratório, obtendo densidades semelhantes aos de obra, foram bem executados.

O ensaio de Wheel-Tracking apresenta como vantagem o facto de se basear num equipamento simples e os procedimentos de ensaio serem também simples. No entanto, observa-se alguma dispersão nos resultados existindo alguns aspectos que podem levar a inferências desadequadas. Por isto a prEN 12697-22 aconselha a realização de 6 provetes por teor em betume, o que obriga a que se disponham de recursos em termos de laboratório e de obra com alguma dimensão. Este facto poderá ser restritivo na utilização deste ensaio para efectuar um continuado controlo de qualidade, podendo, no entanto ser usado como apoio à formulação de misturas no que respeita à caracterização à deformação permanente.

O ensaio de Fluência Dinâmica tem como limitações o facto de o equipamento ser menos simples e portanto com custo superior. Como vantagem refira-se uma maior facilidade de obtenção dos provetes em laboratório e em obra.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] - Pereira, P. e Picado Santos, L. (2002) *Pavimentos rodoviários*, Edição de autor.

[2] - Brown, E. e R., Kandhal, P. S., Zhang, J. (2001) *Performance testing for hot mix asphalt (executive summary)*, NCAT Report No. 2001-05A, NCAT Auburn University, Alabama.

[3] – *Caderno de Encargos do Instituto Português de Estradas*, 1998.

[4] - prEN 12697-22 (2002), *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Wheel Tracking*, CEN.

[5] - PrEN 12697-25 (2001) *Bituminous mixtures – Test methods for mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test*, CEN.

[6] - Freire, Ana C. F. O. R (2002) *Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*, Tese de Doutoramento da FCTUC, Coimbra.