



Universidade do Minho

[CN-03]

Azevedo, M.C.M., **Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A.

“Proposta para uma metodologia para caracterização de misturas betuminosas em laboratório”

10º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Sevilha, 1999, p. 2181-2191

10º Congreso Ibero-Latinoamericano del ASFALTO

Del
**1 al 6 de
noviembre
de 1999**
**Sevilla
España**



III

ORGANIZA
Asociación Española de la Carretera





PROPOSTA PARA UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS EM LABORATÓRIO

Maria da Conceição M. Azevedo

Vogal da Comissão Executiva do CRP

Jorge C. Pais

Professor Auxiliar da Universidade do Minho

Paulo A. A. Pereira

Professor Associado da Universidade do Minho

RESUMO

Neste artigo é proposta uma metodologia para a caracterização mecânica das misturas betuminosas em laboratório, em que se definem os tipos de ensaio, as condições de solitação e os procedimentos a utilizar.

Para a avaliação do módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas, bem como para a avaliação da resistência à fadiga, é proposto o ensaio de flexão em quatro pontos, sobre provetes, cujas dimensões sejam função da máxima dimensão do agregado utilizado.

Para avaliar a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas é proposto o ensaio de corte repetitivo a altura constante, no caso de misturas cuja máxima dimensão do agregado não ultrapassa 25 mm. No caso das misturas betuminosas do tipo 0/37,5, cuja máxima dimensão dos agregados não permite a realização do ensaio de corte é proposta a realização de ensaios de fluência, estáticos.

1. INTRODUÇÃO

Nos pavimentos da rede rodoviária nacional, em Portugal, as misturas betuminosas tradicionais de camada de desgaste são identificadas pela função que desempenham no pavimento, como sejam: com características de desgaste, de regularização ou de base. Por outro lado, uma mistura betuminosa para camada de desgaste tem como máxima dimensão do agregado 16 mm, para camada de regularização tem como máxima dimensão do agregado 25 mm e para camada de base pode apresentar agregados com dimensões máximas de 25 mm ou de 37,5 mm.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade que elas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura, apresentando, nos pavimentos,

um valor máximo de extensão de tracção na base do conjunto das camadas betuminosas. Nos pavimentos flexíveis tradicionais, em que a camada de base do pavimento não é constituída por mistura betuminosa, mas sim por materiais granulares, a resistência ao fendilhamento por fadiga é avaliada na camada de regularização, em mistura betuminosa. Quando a camada de base do pavimento é constituída por uma mistura betuminosa, o fendilhamento é avaliado na parte inferior desta camada.

As deformações permanentes nas misturas betuminosas resultam, em primeiro lugar, da diminuição do seu índice de vazios, mas também de esforços de corte importantes que se instalam, principalmente, nas camadas superiores. Assim, a resistência às deformações permanentes avaliada através de ensaios de corte é mais relevante no caso das misturas betuminosas que compõem a camada de desgaste ou de regularização do pavimento.

O dimensionamento de um pavimento ou do seu reforço por métodos analítico-empíricos, necessita do conhecimento das características mecânicas das misturas betuminosas utilizadas na estrutura do pavimento. Assim, é necessário conhecer o módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson, bem como a resistência aos principais mecanismos de ruína a que os pavimentos estão sujeitos - fendilhamento por fadiga e deformações permanentes -.

2. CARACTERÍSTICAS DE RIGIDEZ E DE RESISTÊNCIA À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

2.1 Características de rigidez

As misturas betuminosas são caracterizadas pelo seu módulo de rigidez e coeficiente de Poisson. Dado o comportamento visco-elástico das misturas betuminosas, é importante ainda o conhecimento do ângulo de fase.

O módulo de rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos. Daqui pode definir-se uma rigidez elástica quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento e uma rigidez viscosa para altas temperaturas e longos tempos de carregamento.

A rigidez elástica, a que correspondem os valores mais elevados da rigidez, é utilizada para caracterização da mistura betuminosa para efeitos de dimensionamento, enquanto a rigidez viscosa é fundamental para a previsão das deformações permanentes.

O coeficiente de Poisson é importante para a análise estrutural de um pavimento pelo que é necessário o seu conhecimento. No entanto esta importância é muito reduzida quando comparada com a importância que o módulo de rigidez assume na análise dos pavimentos.

Nas misturas betuminosas o coeficiente de Poisson é independente do tipo de carregamento variando apenas com a temperatura. O valor do coeficiente de Poisson varia entre 0.35 para baixas temperaturas e 0.50 para altas temperaturas pelo que em Portugal é utilizado frequentemente o valor de 0,35 ou 0,40.

Os resultados do módulo de rigidez e do ângulo de fase podem ser apresentados graficamente recorrendo a curvas de igual temperatura ou de igual frequência tanto para o módulo de rigidez como para o ângulo de fase. Neste artigo é apresentada através da “curva mestra”, considerando uma temperatura de referência de 10 °C.

As curvas mestras são obtidas pela translação das curvas “módulo-frequência” de diversas temperaturas, para uma mesma curva, sendo a translação realizada pela aplicação de um factor de escala $\log(\alpha_T)$, função da temperatura. Esta transformação de escalas permite que as variáveis temperatura e frequência (f) sejam combinadas numa nova variável dada por:

$$X = \log(\alpha_T \cdot f)$$

A vantagem desta curva é permitir, por interpolação, obter o valor do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa, para qualquer combinação de temperatura e frequência, dentro da gama dos valores medidos.

A fórmula geralmente utilizada para definição dos factores de translação baseia-se na equação de Arrhenius, dada por:

$$\log(\alpha_T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_S} \right)$$

sendo:

ΔH	=	energia de activação aparente;
R	=	constante do gás universal (8.314 J/Kmol);
T	=	temperatura de ensaio expressa em K;
T_S	=	temperatura de referência expressa em K.

Outra forma de apresentar o módulo de rigidez e o ângulo de fase de uma mistura betuminosa é realizada através dos chamados “black diagram”, que neste artigo são designados por “diagramas de sombra”. Esta curva apresenta directamente a relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase, permitindo a obtenção da componente elástica do módulo de rigidez (E^∞). Esta característica é obtida por correlação linear entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase, correspondentes a temperaturas inferiores a 30 °C.

2.2 Resistência à fadiga das misturas betuminosas

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é expressa pela relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que produzem a ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios de flexão repetida, tracção directa, ou outros, realizados a determinados níveis de tensão ou extensão.

O carregamento pode ser aplicado em tensão controlada, em que a carga ou a amplitude da tensão permanece constante durante o ensaio, ou em extensão controlada, onde a deformação ou a amplitude da extensão são mantidas constantes durante o ensaio.

Os dois principais factores que afectam a resistência à fadiga das misturas betuminosas são a percentagem de betume e a porosidade da mistura betuminosa. Quanto maior for a percentagem de betume e menor a porosidade, maior é a capacidade da mistura betuminosa para resistir à fadiga.

2.3 Equipamentos para ensaios de resistência à fadiga

As misturas betuminosas que compõem as camadas dos pavimentos estão sujeitos a um estado de tensão semelhante ao apresentado na Figura 1, devendo ser objectivo dos ensaios mecânicos a determinação das propriedades mecânicas dos materiais que compõem o pavimento, simulando um estado de tensão o mais idêntico possível ao verificado em serviço.

Para a avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas existem vários ensaios, quer em laboratório, quer in situ, envolvendo uma variedade de técnicas de ensaio, tais como, diferentes tipos de equipamentos, configuração, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise, em que as tensões ou extensões são aplicadas repetitivamente até que o provete atinja a rotura, ou exiba alterações nas suas características que tornem a mistura betuminosa inadequada ao fim a que se destina.

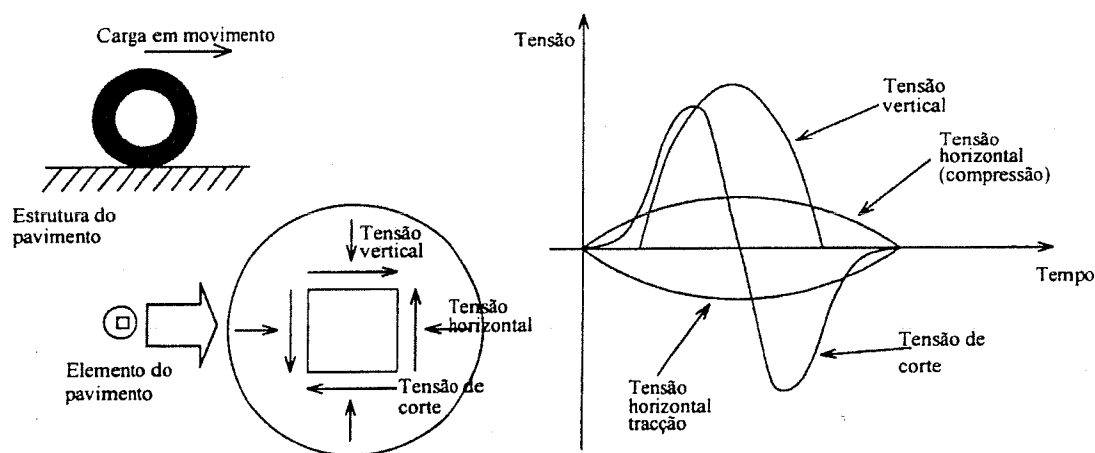


Figura 1 - Estado de tensão induzido por uma carga em movimento

A escolha de um equipamento de ensaio para avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas deve ser realizada tendo como base os seguintes critérios (Azevedo, 1993):

1. Reproduzir as condições in situ tanto quanto possível, nomeadamente quanto aos seguintes aspectos:
 - O estado de tensão induzido pelo tráfego;
 - O carácter repetitivo das solicitações.
2. Simplicidade:
 - Facilidade na preparação dos provetes;

- Quantidade máxima de material necessário para a fabricação de provetes em laboratório;
- Facilidade de utilização de provetes extraídos dos pavimentos;
- Compatibilidade dos resultados com os obtidos noutros laboratórios;
- Dispêndio de reduzidas verbas no equipamento;
- Simplicidade do equipamento;
- Possibilidade de utilização do mesmo equipamento noutros ensaios;
- Reduzido número de parâmetros a medir.

Tendo em consideração os critérios de selecção apresentados, o equipamento para a realização de ensaios para determinação da resistência à fadiga incidiu sobre o ensaio de flexão simples em 4 pontos, uma vez que a carga é repetidamente aplicada em dois pontos da região central do provete, distanciados, de tal maneira, que se dispõe de uma zona central significativa com um estado de tensão uniforme, sendo esta a região onde ocorrem as tensões máximas.

O sistema de apoios para realizar a flexão em 4 pontos (Fig. 2) deve permitir ensaiar vigas prismáticas com dimensões até 15 cm de espessura por 15 cm de base por 100 cm de comprimento, devendo estas dimensões ser utilizadas para ensaiar misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos, em que a máxima dimensão do agregado é de 37.5mm. Para misturas betuminosas de camadas de regularização, em que a máxima dimensão do agregado se situa nos 25 mm, o sistema de apoios deverá permitir ensaiar vigas prismáticas com, pelo menos, 5 cm de espessura por 6 cm de base por 40 cm de comprimento. Torna-se, assim, possível a realização de ensaios sobre provetes representativos.

Para a realização de ensaios de resistência à fadiga em misturas betuminosas, é necessário um equipamento que permita a aplicação de cargas dinâmicas com frequências que podem chegar aos 20 Hz, devendo a máquina de ensaio possuir uma câmara climática para o controlo de temperaturas desde os -20 até $+70$ °C com precisão de ± 0.5 °C, sendo essencial para manter a temperatura constante durante todo o ensaio.

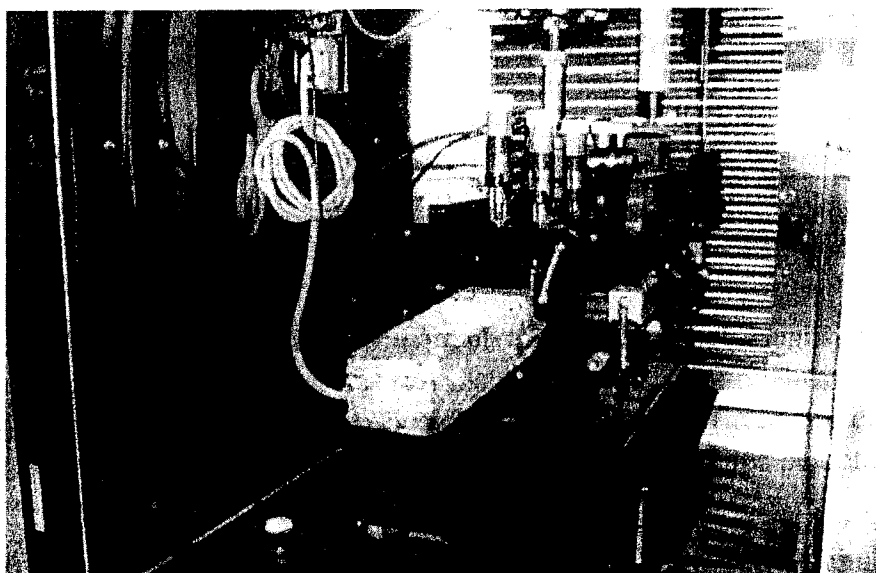


Figura 2 - Dispositivo de flexão em 4 pontos

2.4 Ensaios laboratoriais de rigidez e resistência à fadiga

2.4.1 Determinação do módulo de rigidez e ângulo de fase de uma mistura betuminosa

Para a determinação das propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa, o módulo de rigidez e ângulo de fase, é proposto o ensaio de flexão em 4 pontos, aplicando um carregamento sinusoidal correspondente a uma extensão máxima de tracção na base do provete de 100×10^{-6} . Os ensaios devem ser conduzidos em ordem decrescente de frequência (10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 até 0,1 Hz), devendo-se realizar, pelo menos, 100 ciclos de carga para as primeiras 3 frequências. Para cada temperatura de ensaio devem ser ensaiados 12 provetes. Este número reduzido de provetes ensaiado deve-se à elevada reprodutibilidade obtida nos ensaios efectuados, devidas não só às dimensões dos provetes, mas também, ao tipo de equipamento e ao logaritmo de tratamento de resultados utilizado (Azevedo, 1996).

Os resultados devem ser apresentados na forma de uma curva mestra, de que é exemplo a Figura 3, obtida para uma temperatura de referência de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($284.15\text{ }^{\circ}\text{K}$) e para uma energia de activação aparente do material de $1,17 \times 10^5\text{ J/Kmol}$, extraída do trabalho de Pais (1999).

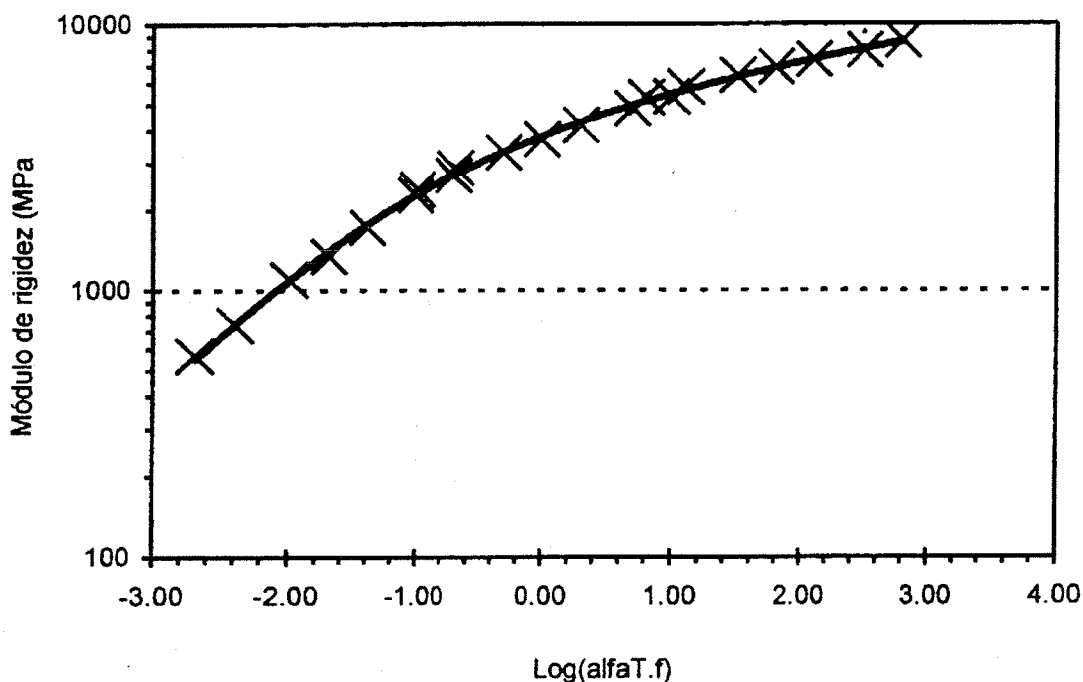


Figura 3 - Curva mestra do módulo de rigidez (Pais, 1999)

Os resultados podem, também, ser apresentados na forma de diagrama de sombra de modo semelhante à Figura 4, permitindo obter o ângulo de fase para determinado módulo de rigidez.

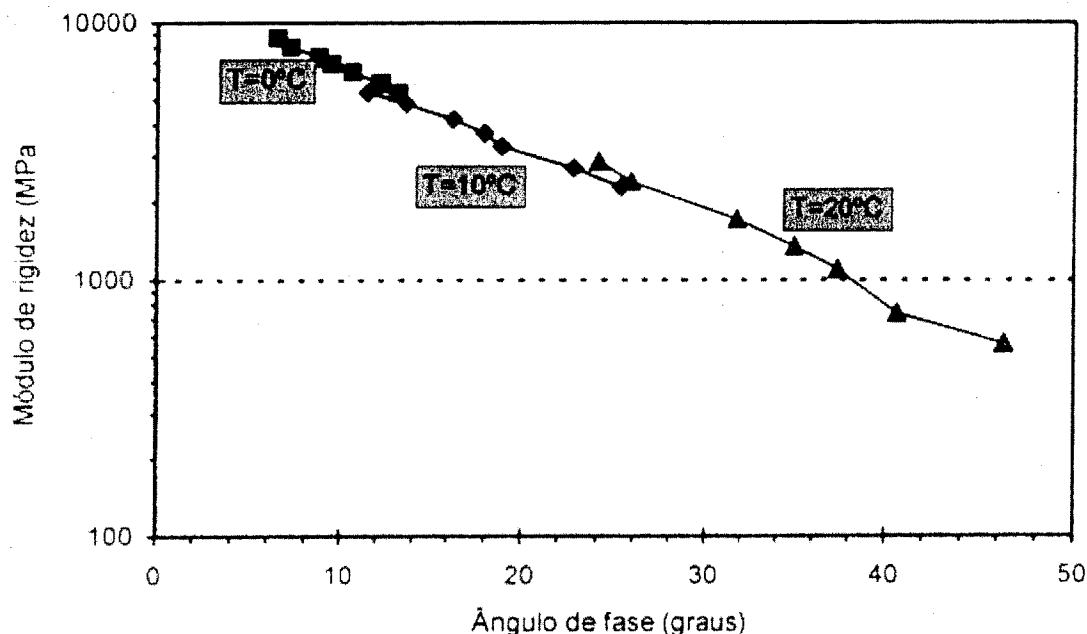


Figura 4 - Diagrama de sombra de uma mistura betuminosa (Pais, 1999)

2.4.2 Determinação da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa

Para o estudo do comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa os ensaios são realizados a 3 níveis de extensão ($200, 400$ e 800×10^{-6}) fazendo-se 6 repetições para cada nível, permitindo obter leis de fadiga com elevado coeficiente de correlação.

3. CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA ÀS DEFORMAÇÕES PERMANENTES

As deformações permanentes dos materiais utilizados nos pavimentos resultam da aplicação repetida das cargas, provocando depressões longitudinais nas rodeiras dos veículos, acompanhadas normalmente por elevações laterais. Estas rodeiras podem ser de pequeno raio quando resultam principalmente da contribuição das camadas betuminosas ou de grande raio no caso de resultarem da contribuição das camadas granulares incluindo a fundação.

As deformações permanentes devidas aos materiais betuminosos resultam de um fenómeno de deformação plástica de corte sem haver densificação, que ocorre junto à superfície do pavimento, sendo causada pelas tensões de corte que se verificam por debaixo dos pneus dos veículos pesados, ocorrendo principalmente nos dias mais quentes perante a passagem dos veículos mais pesados.

As deformações permanentes ocorrem devido à densificação (diminuição de volume à custa da redução do volume de vazios e re-arranjo do esqueleto sólido) e às deformações por

corte que ocorrem nas camadas do pavimento. As deformações por corte verificam-se após a densificação total das misturas betuminosas (após a mistura betuminosa atingir uma porosidade da ordem dos 3%) e ocorrem sem alteração do volume de material (Sousa & Weissman, 1994).

Deste modo, para misturas betuminosas para camadas de desgaste ou de regularização é proposto o ensaio de corte repetitivo a altura constante (RSST-CH), realizado à temperatura média dos 7 dias mais quentes, que se verifica a 5 cm da superfície do pavimento.

Este ensaio é realizado sobre provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro por 5 cm de espessura, devendo o provete possuir 20 cm de diâmetro por 7,5 cm de espessura quando a máxima dimensão do agregado da mistura betuminosa for da ordem de 25 mm.

O ensaio deve ser realizado numa máquina com dois actuadores, um vertical para manter o provete a altura constante e um horizontal no qual se aplicam ciclos de carga correspondentes a 70 kPa durante 0,6 s seguido de um período de repouso de 0,1 s, simulando um veículo pesado a circular a 80 km/h. Na Figura 5 apresenta-se um esquema representativo do funcionamento deste ensaio, sendo este realizado até se atingir a extensão plástica de corte correspondente à profundidade de rodeira desejada (Equação 3) ou 5000 ciclos de carga.

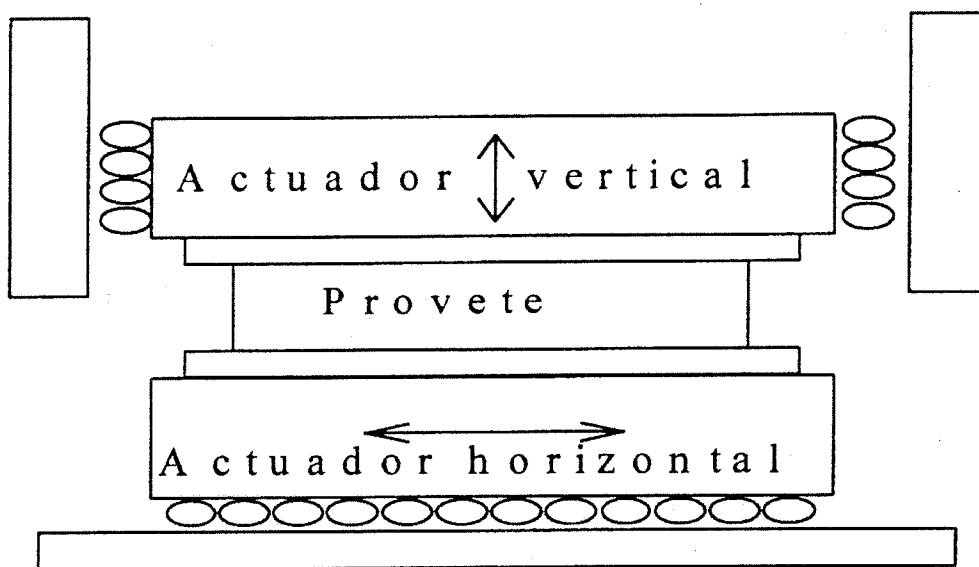


Figura 5 – Esquema representativo do funcionamento do ensaio de corte repetitivo a altura constante

$$\text{Profundidade de Rodeira (mm)} = 279 * \text{Extensão Plástica de Corte} \quad (3)$$

O ensaio de corte permite obter a lei constitutiva do material, em termos de resistência ao corte, ou seja, a lei de variação da extensão plástica de corte com o número de ciclos de carga, tal como se apresenta na Equação 4.

$$EPC = a * \text{Ciclos}^b \quad (4)$$

sendo:

- EPC = Extensão Plástica de Corte;
 $Ciclos$ = número de ciclos de carga;
 a, b = coeficientes função da mistura betuminosa.

A resistência da mistura betuminosa às deformações permanentes é obtida utilizando a Equação 5 a qual relaciona o número de ciclos de carga para atingir a extensão plástica de corte e o número equivalente de eixos de 80 kN que a mistura suporta até atingir a profundidade de rodovia desejada.

$$\log (Ciclos) = - 4.36 + 1.24 \log (Eixos \text{ de } 80 \text{ kN}) \quad (5)$$

O valor da resistência às deformações permanentes de uma mistura betuminosa deve ser obtida pela média de 9 ensaios de corte repetitivo a altura constante.

O ensaio de corte repetitivo a altura constante, utilizado para prever a deformação permanente de uma mistura betuminosa sujeita a veículos pesados circulando a uma velocidade da ordem dos 80 km/h, também pode ser utilizado para prever a deformação permanente para diferentes velocidades das cargas, como demonstra o trabalho de Pereira et al. (1999). Neste caso, a diminuição da velocidade de circulação aumenta a deformação permanente, como se ilustra na Figura 6, devendo o ensaio ser realizado com maiores tempos de carga, os quais proporcionam maiores extensões plásticas de corte no provete (Figura 7) e conseqüentemente maior deformação permanente.

Assim, a utilização do ensaio de corte a altura constante para prever a deformação permanente de veículos circulando a velocidades inferiores a 80 km/h deve ser realizado aplicando tempos de carga dados pela Equação 6, proposta por Pereira et al. (1999).

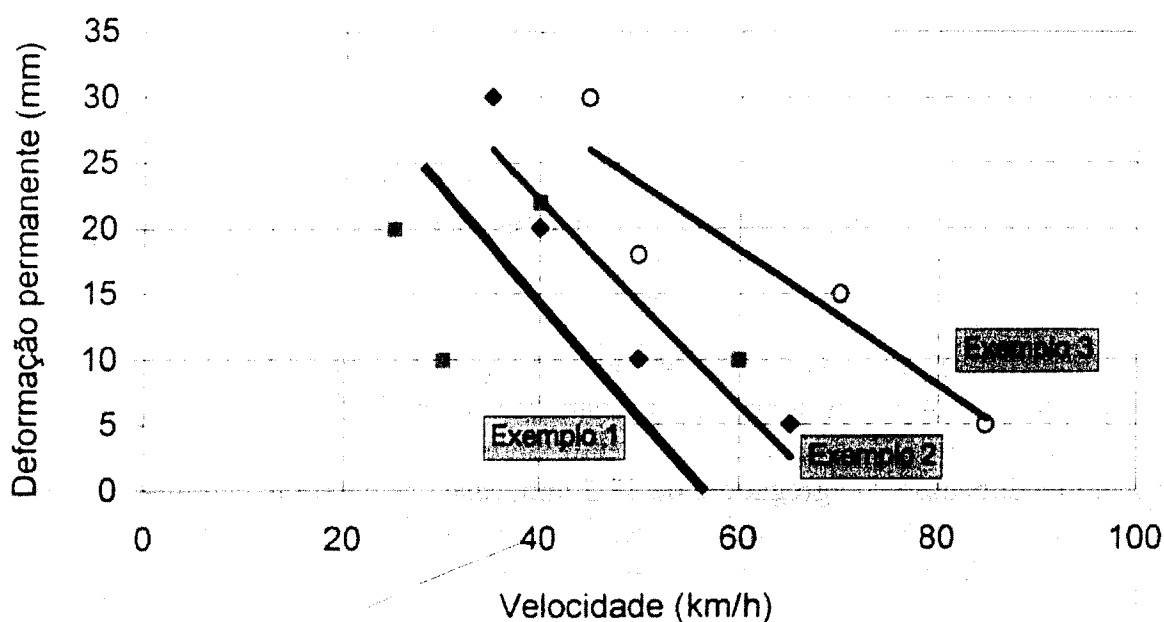


Figura 6 – Influência da velocidade das cargas na deformação permanente (Pereira et al., 1999)

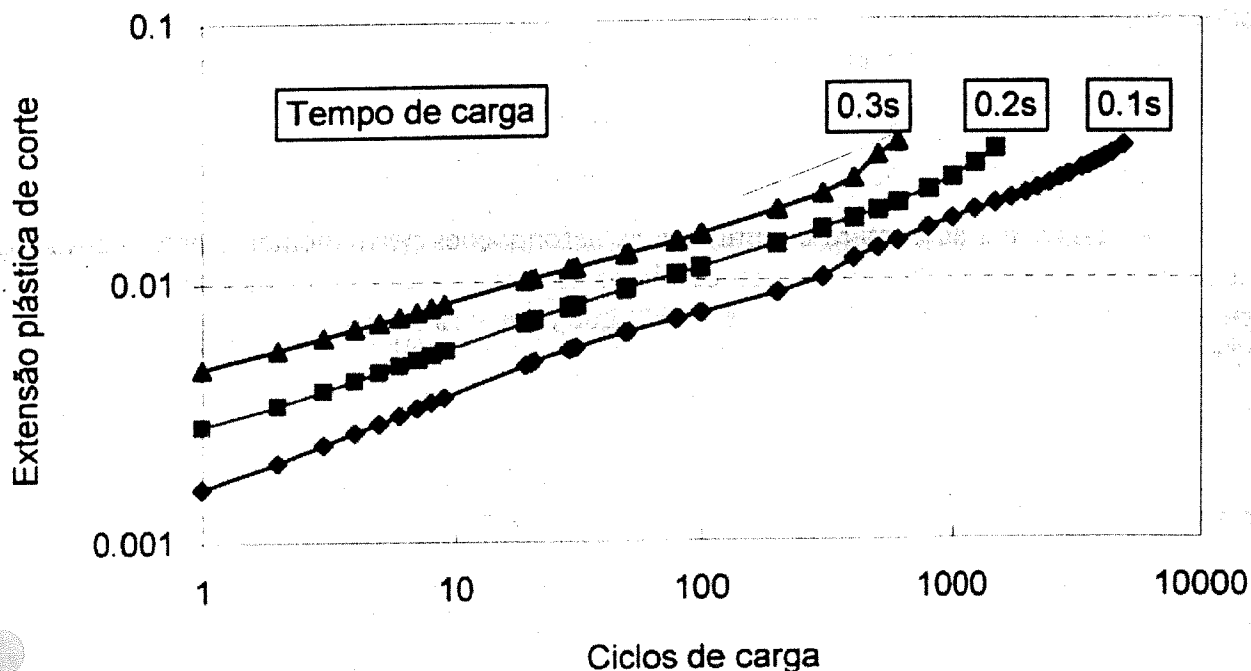


Figura 7 – Influência do tempo de carga na acumulação de deformação permanente (Pereira et al., 1999)

$$\text{Velocidade (km/h)} = -94.9 * \text{Duração da Carga (sec.)} + 73.4 \quad (6)$$

No caso de misturas betuminosas para camadas de base, devida à máxima dimensão do agregado (37,5 mm) e ao mecanismo de ocorrência das deformações permanentes, é proposto o ensaio de fluência. Este ensaio não permite o desenvolvimento de leis de comportamento dos materiais, sendo, no entanto, um ensaio muito simples de executar e de fácil interpretação.

Os ensaios são realizados a uma temperatura de 40 °C, sobre provetes cilíndricos, de 150 mm de diâmetro, registrando-se a deformação sofrida pelo provete ao longo do tempo.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma metodologia para caracterização laboratorial de misturas betuminosas, onde se propõem ensaios e metodologias para avaliação da rigidez, resistência à fadiga e às deformações permanentes.

Para avaliação da rigidez e resistência à fadiga das misturas betuminosas é proposto o ensaio de flexão em 4 pontos sobre vigas prismáticas com dimensões até 15 cm de espessura por 15 cm de base por 100 cm de comprimento, permitindo ensaiar misturas betuminosas em que a máxima dimensão do agregado é de 37,5 mm, caso das misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos ou dimensões menores, no caso de misturas betuminosas para camadas de regularização ou de desgaste.

A determinação do módulo de rigidez e ângulo de fase de uma mistura betuminosa, deve ser realizada aplicando um carregamento sinusoidal correspondente a uma extensão máxi-

ma de tracção na base do provete de 100×10^{-6} . Os ensaios devem ser conduzidos em ordem decrescente de frequência (de 10 a 0,1 Hz), devendo-se realizar 100 ciclos de carga, pelo menos, para as primeiras 3 frequências. Para cada temperatura de ensaio devem ser realizados 12 ensaios.

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa deve ser realizada para 3 níveis de extensão ($200, 400$ e 800×10^{-6}), devendo ser ensaiados 6 provetes para cada nível.

Para avaliação da resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas é proposto o ensaio de corte repetitivo a altura constante (RSST-CH), realizado à temperatura média dos 7 dias mais quentes, que se verifica a 5 cm da superfície do pavimento., para o caso de misturas betuminosas, cuja máxima dimensão do agregado não ultrapassa 25mm.

Este ensaio deve ser realizado sobre provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro por 5 cm de espessura, devendo o provete possuir 20 cm de diâmetro por 7.5 cm de espessura quando a máxima dimensão do agregado da mistura betuminosa for superior a 25 mm. O valor da resistência de um mistura betuminosa às deformações permanentes deve ser obtida pela média de 9 ensaios de corte repetitivo a altura constante.

Para o caso de misturas betuminosas para camadas de base, cujo agregado apresenta dimensões máximas superiores a 25 mm, é proposto o ensaio de fluência a 40 0C, sujeito a uma pressão vertical de 0,15 MPa, durante uma hora.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Azevedo, Maria da Conceição M. "Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos", Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, 1993.
2. Azevedo, Maria da Conceição M. "Características Mecânicas de las Mesclas Bituminosas Utilizadas en las Capas de Base de los Firmes", CARRETERAS, Num. 83 Mayo-Junio, 1996.
3. Pais, Jorge C. "Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis", Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 1999.
4. Pereira, Paulo A. A., Pais, Jorge C., Sousa, Jorge B, "Modeling the Effect of Truck Speed on Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixes", Transportation Research Board, 1999.
5. Sousa, J. B., and Weissman, S. "Modeling Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixtures," Association of Asphalt Paving Technologists, 1994.