



Universidade do Minho

[CN-07]

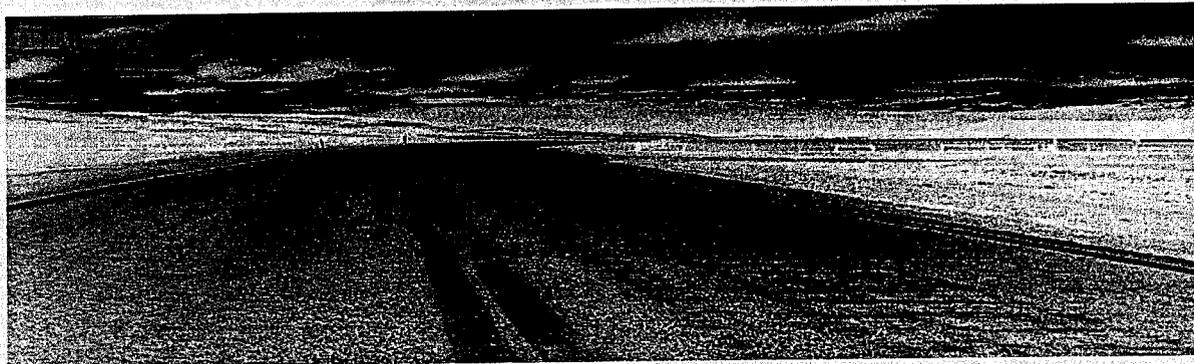
**Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A., Azevedo, M.C.M.

“Ensaio mecânicos para caracterização de misturas betuminosas”

1º Congresso Rodoviário Português – Estrada 2000, Lisboa, 2000, p. 639-649

ESTRADA 2000

# 1.º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS



A QUALIDADE RODOVIÁRIA  
NA VIRAGEM DO SÉCULO  
28 - 30 Novembro 2000  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**CRP.**

CENTRO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS

# ENSAIOS MECÂNICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

JORGE PAIS

Professor Auxiliar da Universidade do Minho

PAULO PEREIRA

Professor Associado da Universidade do Minho

MARIA DA CONCEIÇÃO M. AZEVEDO

Doutora em Engenharia Civil

## 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 de ensaio 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. A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas é avaliada através do ensaio de corte repetitivo a altura constante.

## 1. INTRODUÇÃO

Um pavimento rodoviário flexível é constituído por camadas de materiais granulares não ligados e camadas betuminosas que actualmente é dimensionado recorrendo a método de dimensionamento empirico-mecânicos.

O dimensionamento de um pavimento consiste na definição de uma estrutura que assegure a função estrutural e funcional definida em função de padrões de qualidade estabelecidos para cada pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às acções climáticas, sem sofrer degradações que ponha em risco a funcionalidade do pavimento. A função funcional está rela-

cionada com as características de segurança e conforto da superfície da camada de desgaste do pavimento.

O dimensionamento de um pavimento recorrendo a esta metodologia, consiste em calcular o estado de tensão e deformação devido ao tráfego, fixada a geometria e as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, verificando-se em seguida os critérios de ruína, tal como ilustrado no organograma da Figura 1.

Assim, o dimensionamento de um pavimento necessita da avaliação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas utilizadas na estrutura do pavimento, nomeadamente o módulo de rigidez, o ângulo de fase e a resistência aos principais mecanismos de ruína a que os pavimentos estão sujeitos (fendilhamento por fadiga e deformações permanentes).

## **2. RIGIDEZ E RESISTÊNCIA À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS**

### **2.1. Rigidez e ângulo de fase de uma mistura betuminosa**

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, expresso pelo desfasamento entre a solicitação imposta e a resposta do material.

A 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 a caracterização da mistura betuminosa para dimensionamento enquanto a rigidez viscosa é fundamental para a previsão das deformações permanentes. A rigidez elástica de uma mistura betuminosa é função da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica da mistura betuminosa.

Usualmente, a rigidez de uma mistura betuminosa é avaliada através dos ensaios utilizados para a determinação da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

# ENSAIOS MECÂNICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

JORGE PAIS

*PROFESSOR AUXILIAR, UNIVERSIDADE DO MINHO*

PAULO PEREIRA

*PROFESSOR ASSOCIADO, UNIVERSIDADE DO MINHO*

MARIA DA CONCEIÇÃO AZEVEDO

*DOCTORA EM ENGENHARIA CIVIL, CA&MD*

## 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 solicitação e os procedimentos de ensaio 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. A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas é avaliada através do ensaio de corte repetitivo a altura constante.

## 1. INTRODUÇÃO

Um pavimento rodoviário flexível é constituído por camadas de materiais granulares não ligados e camadas betuminosas que actualmente é dimensionado recorrendo a método de dimensionamento empírico-mecânicos.

O dimensionamento de um pavimento consiste na definição de uma estrutura que assegure a função estrutural e funcional definida em função de padrões de qualidade estabelecidos para cada pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às acções climáticas, sem sofrer degradações que ponha em risco a funcionalidade do pavimento. A função funcional está relacionada com as características de segurança e conforto da superfície da camada de desgaste do pavimento.

O dimensionamento de um pavimento recorrendo a esta metodologia, consiste em calcular o estado de tensão e deformação devido ao tráfego, fixada a geometria e as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, verificando-se em seguida os critérios de ruína, tal como ilustrado no organigrama da Figura 1.

Assim, o dimensionamento de um pavimento necessita da avaliação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas utilizadas na estrutura do pavimento, nomeadamente o módulo de rigidez, o ângulo de fase e a resistência aos principais mecanismos de ruína a que os pavimentos estão sujeitos (fendilhamento por fadiga e deformações permanentes).

## **2. RIGIDEZ E RESISTÊNCIA À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS**

### **2.1. Rigidez e ângulo de fase de uma mistura betuminosa**

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, expresso pelo desfasamento entre a solicitação imposta e a resposta do material.

A 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 a caracterização da mistura betuminosa para dimensionamento enquanto a rigidez viscosa é fundamental para a previsão das deformações permanentes. A rigidez elástica de uma mistura betuminosa é função da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica da mistura betuminosa.

Usualmente, a rigidez de uma mistura betuminosa é avaliada através dos ensaios utilizados para a determinação da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

Dada a reduzida influência do coeficiente de Poisson, este é arbitrado variando o seu valor entre 0,35 para baixas temperaturas a 0,50 para altas temperaturas.

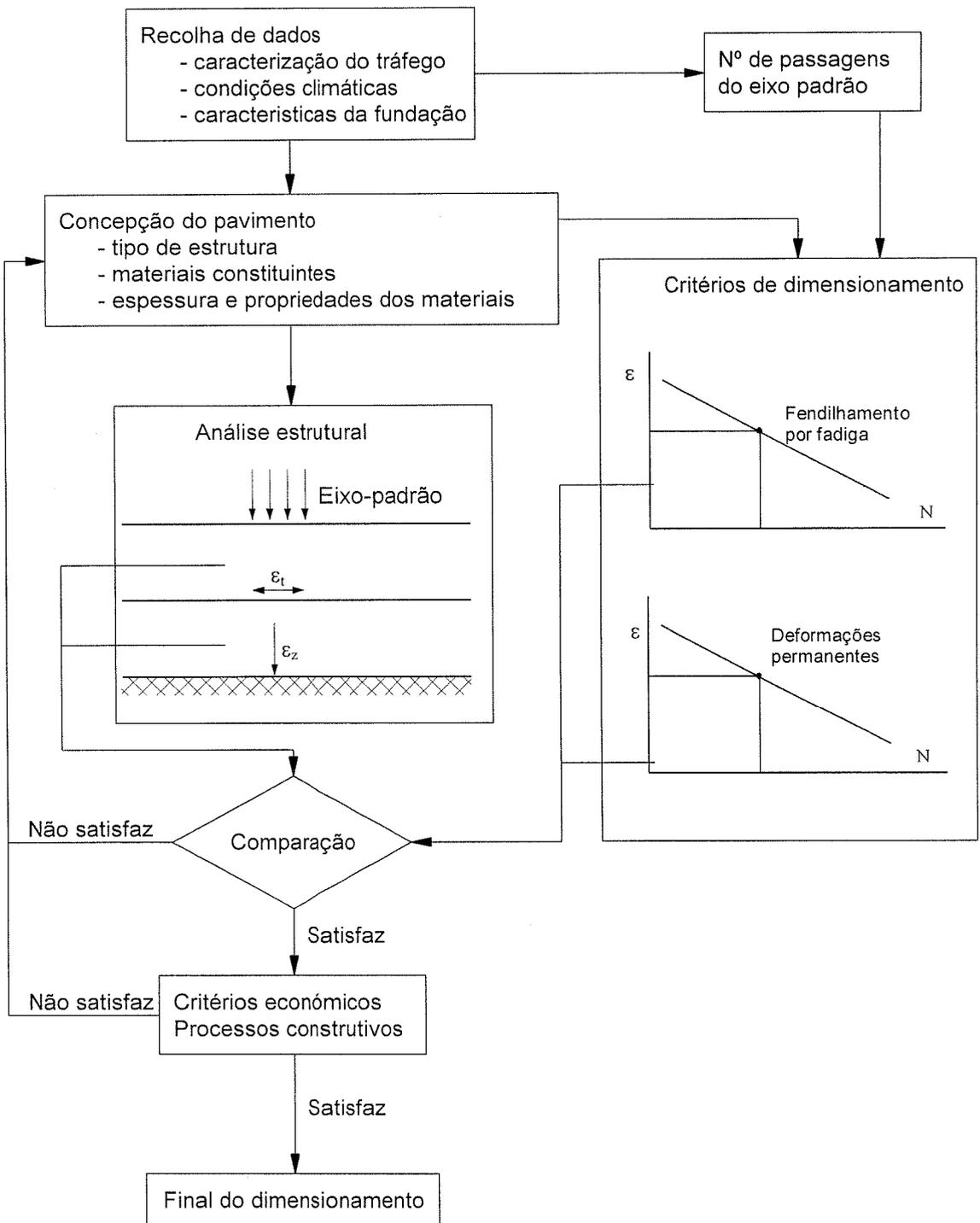


Figura 1 – Organigrama de dimensionamento de pavimentos flexíveis por via empírico-mecânica (Azevedo, M. C., 1993)

## 2.2. Resistência à fadiga das misturas betuminosas

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade que elas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura, sendo expressa como uma relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que conduzem à ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios de carregamento repetido, em flexão, tracção directa ou compressão diametral, realizados a determinados níveis de tensão ou extensão.

O carregamento repetido pode ser aplicado aos provetes com uma variação sinusoidal no tempo, ou com outro tipo de impulso variável no tempo, em tensão ou extensão controlada. No caso dos ensaios com tensão controlada a amplitude da carga ou da tensão permanece constante nas várias aplicações de carga, pelo que a deformação do provete vai aumentando à medida que a rigidez do material diminui; no caso de ensaios em extensão controlada, a amplitude da extensão ou do deslocamento é mantida constante para as várias aplicações de carga, durante o ensaio, pelo que a tensão no provete diminui à medida que a rigidez do material diminui.

No caso de ensaios em extensão controlada, a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, pode ser caracterizada em função do nível de extensão aplicado e da rigidez inicial da mistura betuminosa. A relação entre a resistência à fadiga, o nível de extensão e a rigidez da mistura betuminosa, pode ser expressa pelo modelo desenvolvido por Monismith *et al* (1985), (Equação 1).

$$N_f = a \left( \frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \left( \frac{1}{S_0} \right)^c \quad (1)$$

sendo:

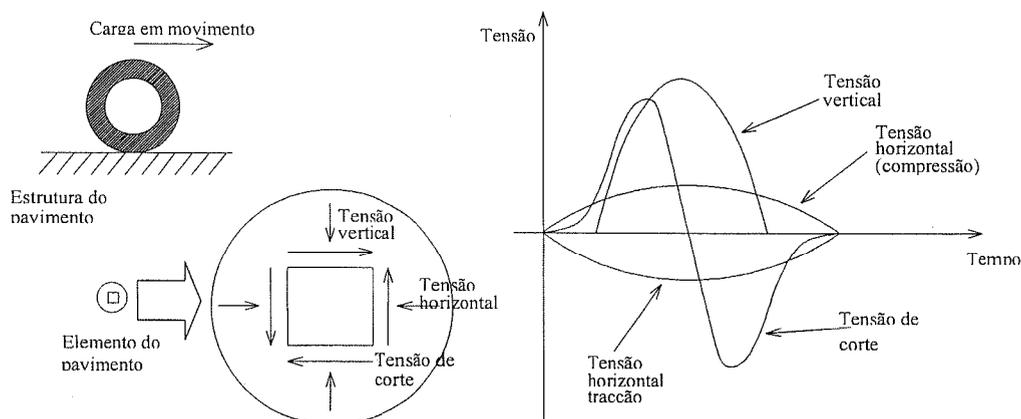
- $N_f$  = número de aplicações da extensão  $\varepsilon_0$  até à rotura;
- $\varepsilon_0$  = extensão de tracção;
- $S_0$  = rigidez inicial da mistura betuminosa;
- $a, b, c$  = coeficientes determinados experimentalmente.

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 determinação da rigidez e da resistência à fadiga

As misturas betuminosas que compõem as camadas dos pavimentos estão sujeitas a um estado de tensão semelhante ao apresentado na Figura 2, 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, 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 2 – Estado de tensão induzido por uma carga em movimento**

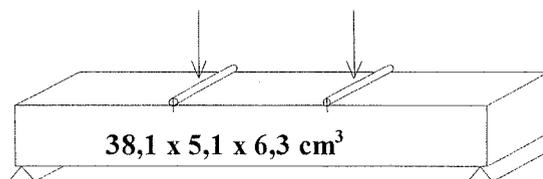
A escolha de um equipamento de ensaio para avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas deve ser realizada tendo como base os seguintes critérios (Azevedo, M. C., 1993):

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;
- Dispendio 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 deve incidir 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, produzindo nessa zona do provete um diagrama de tensões constante e máximo.

O sistema de apoios para realizar a flexão em 4 pontos 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 37,5 mm. Para misturas betuminosas de camadas de regularização, em que a máxima dimensão do agregado se situa nos 19 mm, o sistema de apoios deverá permitir ensaiar vigas prismáticas com 5,1 cm de espessura por 6,3 cm de base por 38,1 cm de comprimento (Figura 3).



**Figura 3 – Ensaio de flexão em 4 pontos**

## **2.4. Ensaio laboratoriais para determinação da rigidez e resistência à fadiga**

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

A determinação das propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa, o módulo de rigidez e ângulo de fase, deve ser realizada recorrendo a ensaios de flexão em 4 pontos, aplicando um carregamento sinusoidal correspondente a uma extensão máxima de tracção na base do provete de  $100 \times 10^{-6}$ . 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 100 ciclos de carga para as primeiras 3 frequências, enquanto nas restantes podem ser aplicados apenas 10 ciclos de carga. Para cada temperatura de ensaio devem ser ensaiados 12 provetes (Azevedo, M. C., 1997).

#### **2.4.2. Determinação da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa**

Para o estudo do comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa deve ser obtida a lei de fadiga da mistura betuminosa que relaciona o nível de extensão com a vida à fadiga. O número de níveis de extensão e o número de ensaios para cada nível deve ser o definido por Pais *et al.* (2000).

### **3. CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA ÀS DEFORMAÇÕES PERMANENTES**

As deformações permanentes dos materiais utilizados nos pavimentos resultam da aplicação repetida das cargas, provocando depressões longitudinais ao longo das 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 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.

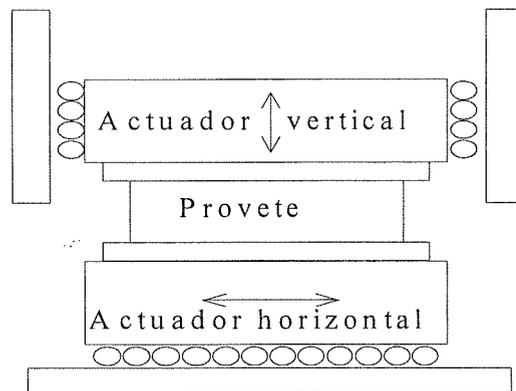
Segundo Sousa & Weissman (1994), as deformações permanentes devidas aos materiais betuminosos resultam de um fenómeno de deformação plástica de corte sem haver densificação, que ocorre junto à superfície do pavimento, sendo causada pelas tensões de corte que se verificam por debaixo dos pneus dos veículos pesados, ocorrendo principalmente nos dias mais quentes perante a passagem dos veículos mais pesados.

Deste modo, o ensaio de corte repetitivo a altura constante (RSST-CH), realizado à temperatura média dos 7 dias mais quentes, que se verifica a 5cm da superfície do pavimento, parece ser o mais indicado para simular este fenómeno.

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 superior a 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 seguindo de um período de repouso de 0,1 s, simulando um veículo pesado a circular a 80km/h. Na Figura 4 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 2) ou 5000 ciclos de carga.



**Figura 4 – Esquema representativo do funcionamento do ensaio de corte repetitivo a altura constante**

$$\text{Profundidade de Rodeira (mm)} = 279 \times \text{Extensão Plástica de Corte} \quad (2)$$

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 3.

$$EPC = a \times \text{Ciclos}^b \quad (3)$$

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 4 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 rodeira desejada.

$$\log(\text{Ciclos}) = -4,36 + 1,24 \log(\text{Eixos de 80 kN}) \quad (4)$$

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, devendo o ensaio ser realizado com maiores tempos de carga, os quais proporcionam maiores extensões plásticas de corte no provete 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 80km/h deve ser realizado aplicando tempos de carga dados pela Equação 5, proposta por Pereira *et al* (1999).

$$\text{Velocidade (km/h)} = -94,9 \times \text{Duração da Carga (s)} + 73,4 \quad (5)$$

#### 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.

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 máxima de tracção na base do provete de  $100 \times 10^{-6}$ . 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 100 ciclos de carga para as primeiras 3 frequências, enquanto nas restantes podem ser aplicados apenas 10 ciclos de carga. Para cada temperatura de ensaio devem ser realizados 12 ensaios.

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.

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.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] - Azevedo, M. "Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos", Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa. 1993.

[2] - Monismith, C., Epps, J. e Finn, F. "Improved Asphalt Mix Design", Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists. 1985.

[3] - Pais, J. e Pereira, P., "Avaliação da Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas", 1º Congresso Rodoviário Português, Lisboa. 2000.

[4] - Pereira, P., Pais, J., Sousa, J., "Modeling the Effect of Truck Speed on Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixes", Annual Meeting of Transportation Research Board. 1999.

[5] - Azevedo, M., "Improved Design Methodology for Basecourse Bituminous Mixtures", 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium, Lyon. 1997.

[6] - Sousa, J., e Weissman, S., "Modeling Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixtures," Association of Asphalt Paving Technologists. 1994.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AZEVEDO, M. – “Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos”, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa. 1993.
- [2] MONISMITH, C., EPPS, J. e FINN, F. – “Improved Asphalt Mix Design”, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists. 1985.
- [3] PAIS, J. e PEREIRA, P. – “Avaliação da Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas”, 1.º Congresso Rodoviário Português, Lisboa. 2000.
- [4] PEREIRA, P., PAIS, J., SOUSA, J. – “Modeling the Effect of Truck Speed on Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixes”, Annual Meeting of Transportation Research Board. 1999.
- [5] AZEVEDO, M. – “Improved Design Methodology for Basecourse Bituminous Mixtures”, 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium, Lyon. 1997.
- [6] SOUSA, J., e WEISSMAN, S. – «Modeling Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixtures,» Association of Asphalt Paving Technologists. 1994.