

## RESISTÊNCIA À FADIGA EM MISTURAS BETUMINOSAS PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Pais, J.C.<sup>1</sup>; Palha, C.A.F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho



### RESUMO

*Perante as cargas do tráfego, as camadas betuminosas dos pavimentos rodoviários estão sujeitas a um estado de tracção na sua base. A passagem repetida das cargas do tráfego provoca um fenómeno de fadiga das misturas betuminosas que origina o fendilhamento das misturas betuminosas e consequentemente dos pavimentos, afigurando-se este como a principal degradação que ocorre nos pavimentos. Desde os anos 60 que o fendilhamento dos pavimentos tem vindo a ser estudado tendo-se desenvolvido inúmeros ensaios para a sua avaliação. Dentre os mais conhecidos encontram-se o ensaio de flexão em quatro pontos sobre vigas prismáticas e o ensaio de tracção indirecta por compressão diametral em provetes cilíndricos. A análise dos resultados destes ensaios relaciona o nível de extensão ou tensão instalada no provete com o número de ciclos de carga que provoca a sua rotura. Este artigo apresenta a forma como a resistência à fadiga das misturas betuminosas é avaliada e considerada no dimensionamento de pavimentos e as tentativas para redução do tempo de ensaio.*

### 1- INTRODUÇÃO

O fendilhamento é a principal degradação que surge nos pavimentos rodoviários e aparece nas misturas betuminosas utilizadas nas camadas superficiais dos pavimentos devido à passagem repetida das cargas dos veículos pesados.

A consideração do fendilhamento no dimensionamento de pavimentos é realizada através do conhecimento da resistência à fadiga das misturas a qual é avaliada através de ensaios mecânicos cíclicos simulando a passagem dos veículos pesados.

Os ensaios de fadiga sobre misturas betuminosas são realizados principalmente em controlo de extensão em que de ciclo

de carga para ciclo de carga a extensão aplicada é constante o que faz com que a força aplicada, e consequente rigidez do material, diminua ao longo do ensaio.

Função do nível de extensão aplicada, os ensaios de fadiga podem requerer um tempo de ensaio em muitos casos superior a um dia, podendo chegar a uma semana. Considerando a necessidade de realização de vários ensaios de fadiga para a obtenção da lei de fadiga que caracteriza uma mistura betuminosa, o tempo de ensaio requerido para uma mistura betuminosa pode claramente ultrapassar uma semana.

Deste modo, nos últimos anos tem-se assistido à procura de métodos de análise que reduzam o tempo necessário à

caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

Deste modo, este artigo apresenta uma análise dos principais métodos de análise da resistência à fadiga das misturas betuminosas, nomeadamente o que recorre à correlação entre os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  no método tradicional de análise da resistência à fadiga e o método baseado no *plateau value*.

Este artigo também analisa a pertinência da normalização europeia na definição das condições de ensaio para a realização dos ensaios de fadiga em misturas betuminosas, principalmente no que respeita ao número de níveis de extensão a ensaiar bem como o número de repetições de ensaio em cada nível.

## 2- RESISTÊNCIA À FADIGA

O dimensionamento de pavimentos utiliza as propriedades mecânicas dos materiais e o seu comportamento em serviço, para obter uma estrutura de pavimento que resista, durante a vida de projecto, às acções previstas aplicadas. A teoria da elasticidade aplicada a estruturas com várias camadas permite obter a resposta do pavimento às acções do tráfego e temperatura. Esta resposta, avaliada através das extensões previstas nos diversos materiais constituintes do pavimento, é utilizada para prever a ruína do pavimento baseada em leis de fadiga obtidas em ensaios laboratoriais.

O dimensionamento de um pavimento, através de um método empírico-mecanicista, utiliza como critérios de ruína a extensão vertical de compressão no topo da camada de fundação como critério de ruína para controlar a deformação permanente do pavimento, e a extensão horizontal de tracção na base das camadas betuminosas, de modo a controlar o fendilhamento por fadiga. Estas extensões estão representadas esquematicamente na Fig. 1.

O dimensionamento de um pavimento consiste então 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 considerados no dimensionamento.

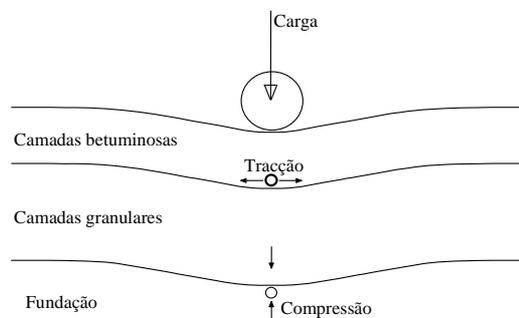


Fig. 1 – Extensões de tracção e compressão usadas como critérios de ruína.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade que elas apresentam para resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura. O fendilhamento por fadiga é um dos principais mecanismos de ruína dos pavimentos e manifesta-se pelo aparecimento de fendas provocadas pelas cargas do tráfego.

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é geralmente expressa como uma 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 laboratoriais de flexão repetida, 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.

A resistência à fadiga é dependente do modo de carregamento. Nos ensaios realizados em tensão controlada, a rotura é bem definida uma vez que a mistura betuminosa apresenta fendas que se desenvolvem até à rotura. Nos ensaios de extensão controlada, a rotura não é visível pelo que se convencionou que a mistura

betuminosa atingiu a rotura quando o seu módulo de deformabilidade inicial foi reduzido em 50%, tal como se apresenta na Fig. 2.

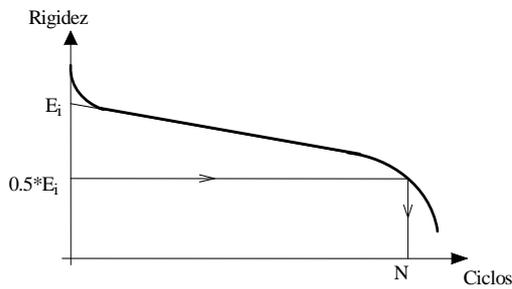


Fig. 2 – Definição da rotura em ensaios de flexão em extensão controlada.

Nos ensaios em extensão controlada, a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, pode ser caracterizada função da extensão aplicada, de acordo com a Eq. (1).

$$N = k_1 \cdot \varepsilon_0^{k_2} \quad (1)$$

onde  $N$  é a resistência à fadiga da mistura betuminosa;  $\varepsilon_0$  é a extensão de tracção;  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes determinados experimentalmente.

Os ensaios de fadiga são realizados em equipamentos servo-hidráulico, tal como apresentado na Fig. 3, o qual permite a realização de ensaios de flexão em 4 pontos, conforme esquematizado na Fig. 4.



Fig. 3 – Equipamento servo-hidráulico para realização dos ensaios de fadiga.

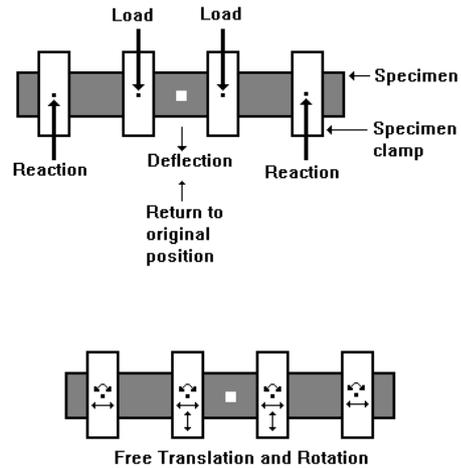


Fig. 4 – Esquema da realização de ensaios de flexão em 4 pontos.

Os resultados dos ensaios de fadiga são expressos em termos de lei de fadiga de acordo com a Eq. (1), podendo ser observados através de um gráfico que relaciona a vida à fadiga com o nível de extensão aplicado, de acordo com a Fig. 5.

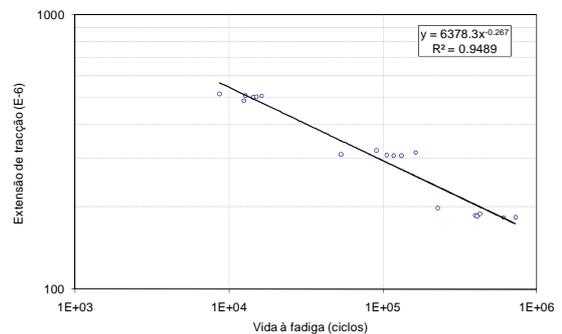


Fig. 5 – Resultados dos ensaios de fadiga expressos em termos de lei de fadiga.

Dado que as misturas betuminosas são, a nível macroscópico, um material extremamente heterogéneo, como pode ser observável na Fig. 6, em que os seus dois principais componentes (agregado e betume) apresentam uma dispersão aleatória ao longo de todo o seu domínio, as propriedades das misturas betuminosas são fortemente influenciadas pelo provete utilizado nos ensaios.

Isto acarreta que os resultados dos ensaios mecânicos sobre provetes de mistura betuminosa apresentam uma dispersão, muitas vezes bastante elevada, como é exemplo os resultados

apresentados na Fig. 5, obrigado a um elevado número de repetições dos ensaios de modo a se obter um valor representativo para a propriedade e avaliar.



Fig. 6 – Mistura betuminosa.

É isto que se passa na avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas em que deve ser realizado um número elevado de ensaios para que o resultado apresente um grau de certeza adequado à propriedade a avaliar.

Apesar da equação que define a resistência à fadiga das misturas betuminosas (Eq. 1) ter dois coeficientes que são determinados experimentalmente, o que obrigaria a realizar ensaios de fadiga apenas a dois níveis diferentes de extensão, é habitual a realização de ensaios de fadiga a vários níveis de extensão como está ilustrado na Fig. 5. Além disto, para cada nível de extensão são realizados vários ensaios, podendo ainda estes ensaios todos serem realizados a diferentes níveis de extensão.

### 3- DIFERENTES ANÁLISES PARA CARACTERIZAR A FADIGA

Diferentes análises têm sido formuladas para definir a resistência à fadiga das misturas betuminosas. Além da formulação clássica, expressa pela Eq. (1), conceitos de energia e dano são usados para definir a fadiga.

O principal conceito recorre à energia dissipada durante o ensaio para definir a fadiga das misturas betuminosas,

uma vez que de acordo com Tayebali et al. (1994), a vida à fadiga é independente do modo de ensaios (ensaio em deformação controlada ou ensaio em força controlada). Também Hopman et al. (1989) e Pronk (1995) utilizam este método de avaliação da vida à fadiga das misturas betuminosas.

Neste método, a energia dissipada em cada ciclo de carga durante o ensaio é dada pela Eq. (2)

$$W_i = \pi \varepsilon_i \sigma_i \sin(\varphi_i) \quad (2)$$

onde  $w_i$  é a energia dissipada em cada ciclo  $i$ ;  $\varepsilon_i$  é a extensão de tracção em cada ciclo  $i$ ;  $\sigma_i$  é a tensão instalada em cada ciclo  $i$ ;  $\varphi_i$  é o ângulo de fase no ciclo  $i$ .

A lei de fadiga de uma mistura betuminosa é relacionada com a energia dissipada de acordo com a Eq. (3).

$$W_f = C(N_f)^z \quad (3)$$

Uma diferente aproximação para definir a resistência à fadiga das misturas betuminosas recorre à evolução do dano durante os ensaios. Um dos principais modelos deve-se a Di Benedetto et al. (1996) e baseia-se no dano relativo que a mistura sofre durante o ensaio de fadiga. O método caracteriza a perda de rigidez de acordo com a Eq. (4).

$$D = \frac{E_o - |E^*|}{E_o} \quad (4)$$

onde  $D$  é o parâmetro de dano no ciclo  $i$ ;  $E_o$  é o módulo de rigidez no início do ensaio e  $|E^*|$  é o módulo de rigidez no ciclo  $i$ .

No entanto, a mais promissora teoria para análise da fadiga em misturas betuminosas foi desenvolvida por Kim et al (1997) utilizando a teoria da viscoelasticidade aplicada às misturas betuminosas bem como a teoria do dano contínuo. Este método é fundado num modelo constitutivo da viscoelasticidade uniaxial que toma em consideração a evolução do dano sob condições cíclicas de carregamento.

O princípio da correspondência elástico-viscoelástica é aplicado para avaliação da evolução do dano e da recuperação da mistura durante o carregamento cíclico.

A evolução do dano durante o ensaio e a recuperação da mistura durante os períodos de repouso são modelados utilizando a teoria do trabalho potencial, a teoria do dano contínuo baseada na termodinâmica de um processo irreversível.

A vantagem desta teoria baseia-se no facto de permitir converter problemas viscoelásticos, como é o caso dos ensaios sobre misturas betuminosas, em problemas elásticos e deste modo reduzir o número de simplificações na análise de ensaios de fadiga em misturas betuminosas.

Outras teorias têm sido aplicadas ao estudo da fadiga em misturas betuminosas como é exemplo a utilização do grau de variação da energia dissipada (RDEC) devida a Carpenter e Jansen (1997). Esta aproximação não considera toda a energia dissipada como responsável pela fadiga das misturas betuminosas, atribuindo a fadiga apenas à quantidade de energia dissipada devido a cada ciclo adicional.

O grau de variação da energia dissipada acumulada, RDEC, pode ser calculado de acordo com a Eq. (5), sendo que os valores típicos dos ciclos seguidos  $a$  e  $b$  para o cálculo do RDEC deve ser de 100, ou seja  $b-a=100$ , de acordo com Shen e Carpenter (2007). No entanto, os mesmos autores recomendam a utilização de valores da ordem dos 1000 ou mesmo 10000 quando a variação da energia seja muito pequena.

$$RDEC_a = \frac{DE_a - DE_b}{DE_a \times (b - a)} \quad (5)$$

onde  $a$  e  $b$  são ciclos de carga consecutivos,  $RDEC_a$  é grau de variação da energia dissipada no ciclo  $a$  comparativamente ao ciclo  $b$ ,  $DE_a$  e  $DE_b$  são as energias dissipadas respectivamente nos ciclos  $a$  e  $b$ .

Os valores típicos do RDEC ao longo de um ensaio de fadiga encontram-

se representados na Fig. 7, onde é possível observar três fases. Na fase I o RDEC diminui rapidamente com o número de ciclos de carga, enquanto a fase III aumenta rapidamente. Na fase II o RDEC permanece constante, verificando-se que é nesta fase que se atinge a rotura do provete de ensaio.

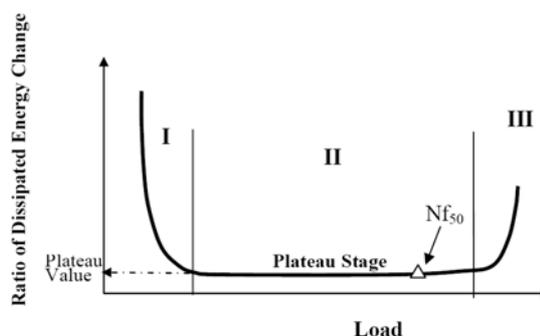


Fig. 7 – Resultados típicos do RDEC ao longo de um ensaio de fadiga.

O RDEC no ciclo em que a rigidez do material se reduz para 50% da sua rigidez inicial é definido como o “plateau value”, PV, como se indica na Fig. 7. Segundo Ghuzlan e Carpenter (2000) o plateau value pode ser correlacionado com a resistência à fadiga das misturas betuminosas. Também Shen e Carpenter (2005) encontraram uma relação única entre o *plateau value* e a resistência à fadiga para diferentes tipos de misturas, modos de carregamento, níveis de carga e condições de ensaio (frequência, períodos de repouso e temperatura), expressa pela Eq. (6).

$$PV = 0.4428Nf_{50}^{-1.1102} \quad (6)$$

onde PV é o *plateau value* e  $Nf_{50}$  é a resistência à fadiga da mistura betuminosa.

O mais promissor método para caracterizar a resistência à fadiga de misturas betuminosas faz uso dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  da Eq. (1) tendo por base o facto de Monismith e Salam (1972) referirem a existência de uma relação entre  $k_1$  e  $k_2$  de acordo com a Eq. (7).

$$k_2 = f(\log(k_1)) \quad (7)$$

Este facto leva a que seja apenas necessário a realização de ensaios de fadiga a apenas um nível de extensão com o qual se obteria o coeficiente  $k_1$ .

Também Lytton et al (1993) refere que, baseado em ensaios de fractura, o parâmetro  $k_1$  é função de  $k_2$  e de um parâmetro A que define o grau de propagação de fendas e da rigidez da mistura betuminosa.

Mais recentemente, Zhou et al (2007) encontrou a Eq. (8) para correlacionar  $k_1$  com  $k_2$ .

$$k_1 = 10^{6.97 - 3.20k_2 - 0.837 \log(E)} \quad (8)$$

Ainda utilizando esta metodologia, Mello (2008) encontrou, para as 37 misturas que estudou na sua tese de doutoramento, a relação apresentada na Fig. 8 para os coeficientes  $k_1$  com  $k_2$ , o que permite encarar, com bastante optimismo, a hipótese dos ensaios de fadiga necessitarem de ser realizados a apenas um nível de extensão.

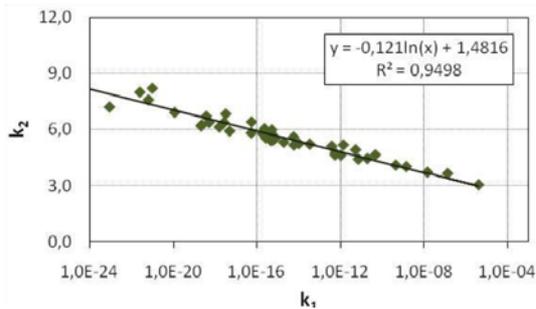


Fig. 8 – Relação entre os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  (Mello, 2008).

Conclusão idêntica foi obtida por Pais et al (2009a) para 36 misturas de diferentes tipos, representativas de camadas de desgaste, regularização, base e para misturas de alto módulo, de acordo com o expresso na Fig. 9. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) obtido de 0.98 deixa antever uma forte possibilidade de utilização de apenas um parâmetro para a definição da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

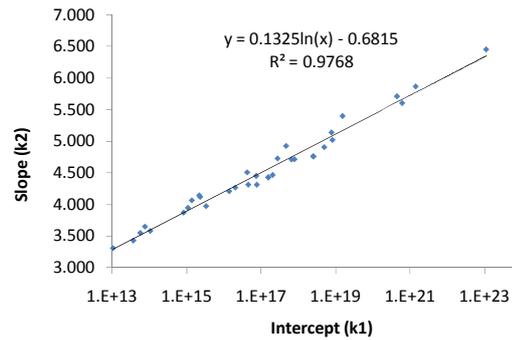


Fig. 9 – Relação entre os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  (Pais et al, 2009a).

#### 4- NORMAS DE ENSAIO PARA A FADIGA

As principais normas de ensaio para avaliação da resistência à fadiga de misturas betuminosas incluem a norma americana AASHTO T321-03 (2003) e norma europeia EN 12697-24 (2004). Em ambas as normas, a avaliação da resistência à fadiga recorrendo a ensaios de flexão em 4 pontos define que a rotura do material acontece no instante em que a sua rigidez atingiu metade da rigidez inicial do material.

Para a definição de número de ensaios para obtenção de uma lei de fadiga, a norma americana nada refere quanto ao número de ensaios ou número de níveis de extensão. Ao contrário desta, a norma europeia define que a resistência à fadiga deverá ser avaliada utilizando 18 provetes a serem ensaiados a 3 diferentes níveis de extensão, a que correspondem 6 provetes para cada nível.

É opinião dos autores que a utilização de 3 níveis de ensaio se afigura desadequado à obtenção de uma lei de fadiga em que apenas dois coeficientes necessitam de ser determinados, ou seja, a lei de fadiga (Eq. 1) é uma recta numa escala log-log.

Em relação à definição do número de níveis de extensão convém referir que certos materiais não apresentam um comportamento linear numa escala log-log, como referido por Peyronne e Caroff (1984), e daí a possível justificação para a utilização de mais que 2 níveis de

extensão. No entanto, este facto apenas acontece quando se ensaiam níveis de extensão extremamente baixos, os quais, por norma, não são utilizados nos ensaios de fadiga.

Quanto aos níveis de extensão, a norma europeia define que o nível mais baixo a ser ensaiado deverá corresponder ao qual a vida à fadiga da mistura betuminosa seja aproximadamente 1 milhão de ciclos de carga, requerendo aproximadamente 1 dia de ensaio. No entanto, dependendo do provete a ensaiar, e da dispersão das propriedades do provetes, o tempo de ensaio poderá atingir facilmente vários dias ou até uma semana. Os níveis de extensão intermédios requerem no máximo meio-dia (12 horas) de ensaio, enquanto que os níveis de extensão mais altos, requerem ensaios de aproximadamente 1 a 2 horas.

Um programa de ensaios definido deste modo pode necessitar de um tempo de ensaio entre 2 semanas a 1 mês.

Durante o programa SHRP, onde um extenso programa de investigação sobre fadiga das misturas betuminosas foi realizado, Tayebali et al. (1994) definiram que a resistência à fadiga, expressa em termos de lei de fadiga, poderia ser avaliada recorrendo a um procedimento que requeria aproximadamente 24 horas de ensaio.

O procedimento proposto envolve o ensaio de apenas 4 provetes, cada uma a um diferente nível de extensão de modo à vida à fadiga de cada provete estar compreendida aproximadamente entre 5000 ciclos e 500 000 ciclos de carga.

O primeiro ensaio deverá ser realizado a um nível elevado de extensão de modo que o provete tenha uma vida entre 5000 e 10000 ciclos de carga. Como valor inicial para a extensão é recomendado 800 a 1000 microstrains, correspondente à amplitude total da onda sinusoidal aplicada. Caso a vida à fadiga seja superior a 10000 ciclos o segundo ensaio deve ser realizado a um nível superior de extensão, garantindo que os dois primeiros ensaios são realizados em menos de 2 horas.

Se os dois primeiros ensaios são realizados a diferentes níveis de extensão, então os resultados podem ser utilizados para obter uma primeira aproximação da lei de fadiga e utilizada para prever o nível de extensão para o terceiro ensaio. Este deverá conduzir a uma vida à fadiga de aproximadamente 100000 ciclos de carga requerendo cerca de 4 horas de ensaio.

Quanto ao último ensaio, recorrendo à lei de fadiga com os três primeiros ensaios, é possível determinar o nível de extensão para o qual o provete suporta entre 350000 a 500000 ciclos de carga. Este ensaio consegue ser realizado em aproximadamente 15 horas devendo ser ensaiado desde o final do dia até ao início do dia seguinte, conseguindo-se deste modo avaliar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa em 24 horas.

## 5- ANÁLISE DO NÚMERO DE ENSAIOS

Com o intuito de estudar sobre a necessidade de serem realizados 18 ensaios de fadiga para caracterizar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa tal como preconiza a norma europeia, neste trabalho é apresentada uma análise combinatória recorrendo a resultados de três misturas betuminosas ensaiadas de acordo com a referida norma.

Cada mistura, representativa de uma camada de base de pavimentos rodoviários, foi ensaiada utilizando 3 níveis de extensão e 6 repetições para cada nível de extensão. Informação mais detalhada sobre as misturas pode ser encontrada em Pais et al. (2009b).

Os resultados dos ensaios, expressos em termos de leis de fadiga encontram-se na Fig. 10 onde é possível observar que a dispersão na vida à fadiga das várias misturas e a correspondente a cada nível de extensão. Além disto, pode concluir-se que as leis de fadiga obtidas com os 18 ensaios representam com elevada precisão a fadiga das misturas betuminosas.

## Resistência à Fadiga em Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários

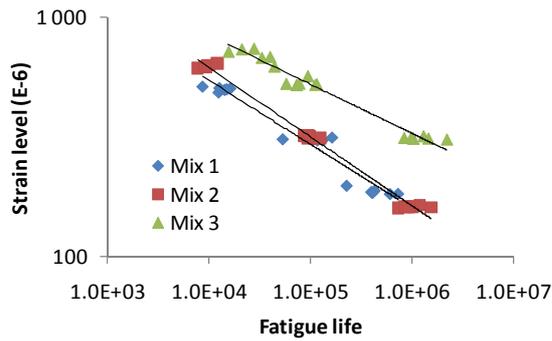


Fig. 10 – Resultados dos ensaios de fadiga de acordo com a norma europeia.

O problema da definição do número de níveis de extensão e o número de ensaios para cada nível de extensão prende-se com o facto de se tentar evitar que uma possível combinação de níveis de ensaio e provetes provoque uma vida à fadiga da mistura betuminosa não representativa do seu real comportamento.

Para a análise do número de níveis de ensaio e provetes a utilizar na avaliação da resistência à fadiga foi realizada uma análise combinatória com todas as combinações possíveis com os 3 níveis de extensão e com os 6 provetes ensaiados tendo-se avaliado o valor máximo e mínimo que a vida à fadiga apresenta para cada combinação.

Os resultados desta análise encontram-se representados nas Fig. 11, 12 e 13, respectivamente para as misturas 1, 2 e 3.

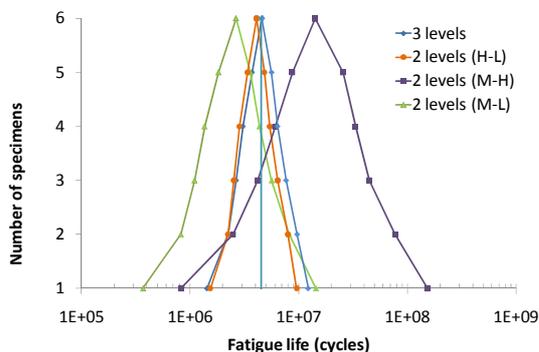


Fig. 11 – Valor máximo e mínimo da resistência à fadiga da mistura 1.

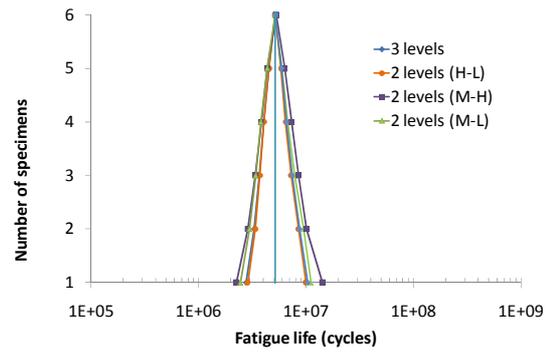


Fig. 12 – Valor máximo e mínimo da resistência à fadiga da mistura 2.

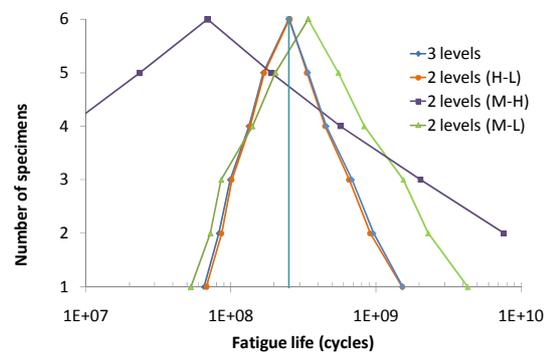


Fig. 13 – Valor máximo e mínimo da resistência à fadiga da mistura 3.

A análise destas figuras permite concluir que a utilização de 3 níveis de extensão conduz aos mesmos limites que utilizando apenas o nível alto e o baixo, podendo-se afirmar que o nível intermédio não acrescenta precisão à obtidas com os restantes.

Quanto à utilização do nível médio de extensão com um dos outros (alto ou baixo), a análise realizada permite concluir que a sua utilização não é recomendada uma vez que distorce claramente a tendência da vida à fadiga.

Quanto ao número de ensaios, verifica-se que a utilização de 3 ensaios por nível de extensão parece conduzir a um valor da vida à fadiga compatível com as exigências associadas à análise de pavimentos, pelo que a obtenção de uma lei de fadiga apenas deve ser realizada recorrendo ao ensaio de 2 níveis de extensão (um alto e um baixo), ensaiando-se 3 provetes em cada nível.

## 6- ANÁLISE DE DIFERENTES MÉTODOS PARA CARACTERIZAR A FADIGA

O mais promissor método para caracterizar a resistência à fadiga de misturas betuminosas faz uso dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  da Eq. (1) uma vez que parece requerer que seja apenas necessário realizar ensaios a um nível de extensão, o que pode ser conseguido ensaiando-se provetes a um alto nível de extensão, os quais requerem um reduzido tempo de ensaio.

Para a verificação da aplicabilidade deste método foram estudadas 53 misturas betuminosas para as quais se verifica que a relação entre  $k_1$  e  $k_2$  é excelente ( $R^2=0.980$ ), de acordo com a Fig. 14.

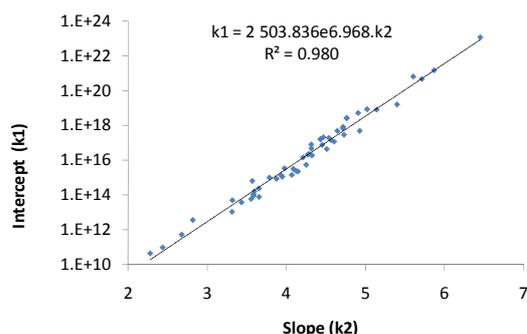


Fig. 14 – Relação entre os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ .

Apesar da correlação entre  $k_1$  e  $k_2$  indicar que apenas será necessário um destes parâmetros para caracterizar a resistência à fadiga, verifica-se que o cálculo do  $k_2$  utilizando os resultados de fadiga obtidos em laboratório para um nível alto de extensão (800 microstrains), conduz a valores que em nada se aproximam dos obtidos quando se calculam os dois parâmetros da mistura betuminosa ( $k_1$  e  $k_2$ ), tal como pode ser observado na Fig. 15.

A situação continua a não ser precisa mesmo quando se utilizada os resultados de laboratório obtidos a níveis baixos de extensão, como é o caso de 100 microstrains, para o qual o coeficiente  $k_2$  obtido em pouco representa o valor real do coeficiente  $k_2$ , como se demonstra na Fig. 16.

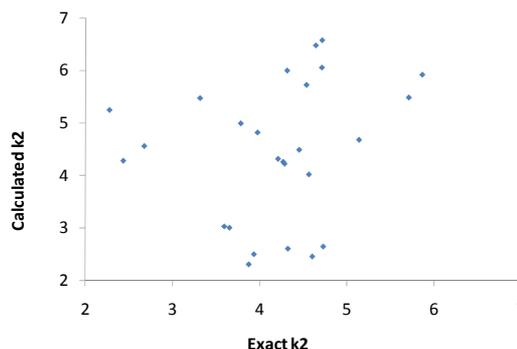


Fig. 15 – Relação entre o coeficiente  $k_2$  real e previsto utilizando apenas a extensão de 800 microstrains.

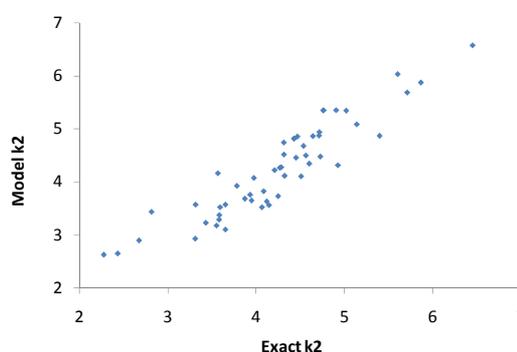


Fig. 16 – Relação entre o coeficiente  $k_2$  real e previsto utilizando apenas a extensão de 100 microstrains.

A não aplicabilidade do método é ainda mais evidente quando se utiliza os resultados de laboratório para a extensão de 800 microstrains para prever a vida à fadiga da mistura betuminosa, como se indica na Fig. 17.

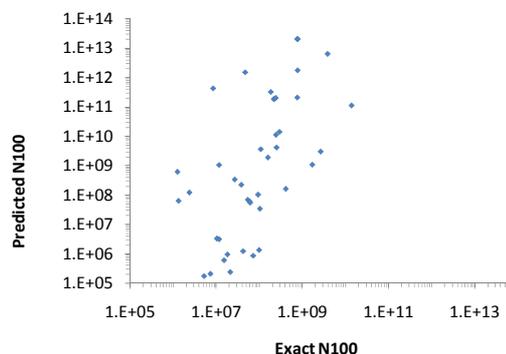


Fig. 17 – Comparação da resistência à fadiga real para uma extensão de 100 microstrains e a vida obtida utilizando o coeficiente  $k_2$  calculado apenas com os resultados da extensão de 800 microstrains.

A análise realizada permite concluir que, apesar da relação entre os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  indicar que estes coeficientes estão

correlacionados, a definição de leis de fadiga com apenas um destes coeficientes não representa o comportamento real das misturas betuminosas.

Em relação à utilização do *plateau value* para previsão da vida à fadiga das misturas betuminosas, de acordo com o estudo realizado por Pais et al. (2009c), o grau de energia dissipada por ciclo pode apresentar inúmeras configurações sendo de destacar as apresentadas na Fig. 18, nomeadamente uma evolução constante ao longo do ensaio ou uma diminuição ao longo do ensaio.

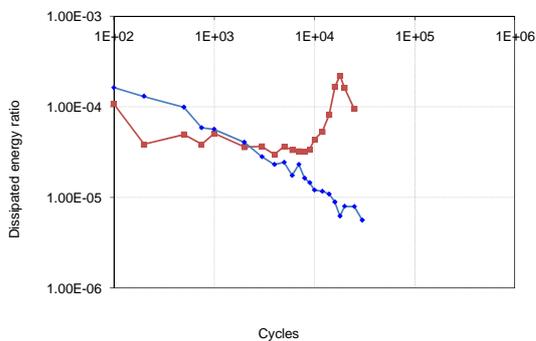


Fig. 18 – Evoluções típicas do grau de energia dissipada por ciclo.

Uma evolução do grau de energia dissipada constante permite a aplicação do método de *plateau value* enquanto que as restantes evoluções o inviabilizam.

As situações em que o grau de energia dissipada não apresentam patamar e deste modo não permitem a aplicação do método devem-se ao facto da energia dissipada por ciclo medida durante o ensaio não ter uma evolução regular durante o ensaio, sendo este facto atribuído ao servo-controlo dos ensaios.

Deste modo, Pais et al. (2009c) propuseram um método que permite contornar este problema baseado na utilização da energia acumulada dissipada durante os ensaios de fadiga. Esta segue uma evolução como representada na Fig. 19, ou seja um comportamento linear numa escala log-log ao longo de todo o ensaio.

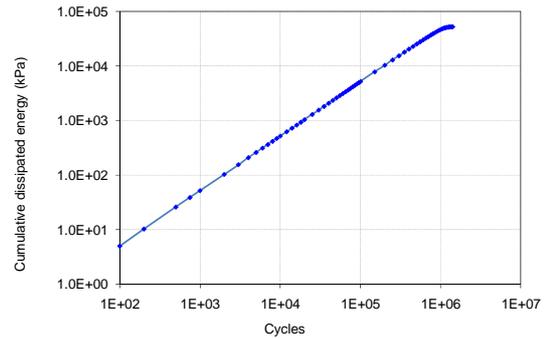


Fig. 19 – Evolução da energia dissipada acumulada ao longo de um ensaio de fadiga.

O método proposto calcula, a partir da energia dissipada acumulada, a energia para determinados ciclos de carga e utiliza esses valores para calcular o grau de energia dissipada por ciclo. Para assegurar que o grau de energia dissipada por ciclo se reduz para os ciclos de carga considerados, são considerados os seguintes ciclos: 1E3, 2E3, 5E3, 1E4, 2E4, 5E4 e 1E5, ou seja, pontos aproximadamente espaçados na escala logarítmica, correspondentes a três pontos em cada ordem de grandeza.

O *plateau value* é então definido como o valor médio do grau de energia dissipada nos ciclos considerados, não sendo considerados valores negativos.

A aplicação do método proposto a 3 misturas betuminosas conduziu à lei apresentada na Fig. 20 que relaciona de forma razoável a evolução do *plateau value* com a vida à fadiga das misturas betuminosas.

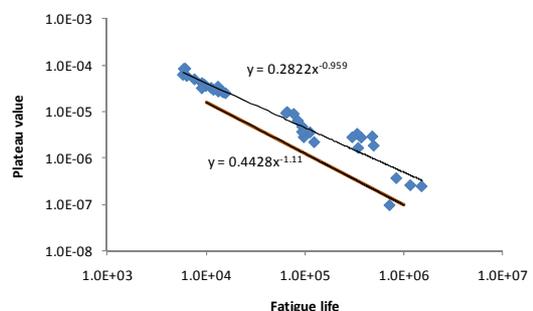


Fig. 20 – Evolução do *plateau value* com a vida à fadiga das misturas betuminosas.

Esta análise permite concluir que há uma lei única que relaciona o *plateau*

*value* com a vida à fadiga das misturas betuminosas. Além disto, verifica-se que para vidas à fadiga reduzidas, as quais correspondem a níveis de extensão elevados, a correlação entre o *plateau value* e a vida à fadiga é excelente.

Esta conclusão permite que os ensaios de fadiga sejam realizados a níveis elevados de extensão e com recurso ao *plateau value* a vida à fadiga seja prevista para cada ensaio. Além disto, como o *plateau value* surge muito antes do ensaio atingir a rotura, este procedimento permite que os ensaios de fadiga não sejam realizados até à rotura reduzindo claramente o tempo de ensaio requerido para o ensaio das misturas betuminosas.

## 7- CONCLUSÕES

Este artigo fez um resumo das principais abordagens actualmente utilizadas para avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas, com principal ênfase para as abordagens que têm como objectivo a redução do tempo de ensaio. Foi também analisada a forma como a normalização europeia preconiza a avaliação da resistência à fadiga e a pertinência das especificações nela definidas.

A análise aos número de níveis de extensão a utilizar nos ensaios de fadiga bem como o número de provetes para cada nível de extensão permitiu concluir que é suficiente a utilização de 2 níveis de extensão (um alto e um baixo) para obter a mesma precisão que a obtida com os 3 níveis recomendados. Nestes dois níveis não deve ser incluído um nível médio de extensão. Quanto ao número de ensaios, verifica-se que a utilização de 3 ensaios por nível de extensão conduz a uma vida à fadiga compatível com as exigências associadas à análise de pavimentos.

Em relação ao método que utiliza a correlação entre  $k_1$  e  $k_2$  da análise tradicional da resistência à fadiga, apesar da correlação entre os dois coeficientes indicar a necessidade de apenas um deles, verifica-se que os valores que se obtêm para  $k_2$  partindo dos resultados de

laboratório para apenas um nível de carga, em nada se assemelham aos que realmente caracterizam a fadiga das misturas betuminosas. Também a vida à fadiga obtida com  $k_2$  partindo dos resultados de laboratório não corresponde à real pelo que o método não pode ser aplicado na avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

O método de avaliação da resistência à fadiga baseado no conceito do grau de energia dissipada por ciclo e consequente *plateau value* parece ter aplicação desde que o grau de energia dissipada seja avaliado a partir da energia dissipada acumulada ao longo do ensaio, utilizando-se para o efeito determinados ciclos de carga. A lei obtida entre o *plateau value* e a vida à fadiga recomenda a utilização de níveis de extensão preferencialmente altos, onde a correlação é maior.

## 8- REFERÊNCIAS

- Peyronne, C, Caroff, G. 1984. Dimmensionnement des chaussées, cours de routes, Ed. Press de l'École National des Ponts et Chaussées – Paris.
- Tayebali, A.A., Deacon, J.A., Coplantz, J.S., Harvey, J.T., Monismith, C.L., Fatigue response of asphalt-aggregate mixtures. Report A404. SHRP, 1994.
- Hopman, P.C., Kunst, P.A.J., Pronk, A.C. 1989. A renewed interpretation method for fatigue measurements: verification of the Miner's rule. Proceeding of the 4th Eurobitume Symposium, Madrid.
- Pronk, A.C. 1995. Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements in the crack initiation phase. Research Report n° P. DWW-95.001. Ministerie Van Verkeer en Waterstaat. The Netherland.
- Di Benedetto, H., Soltani, A., Chaverot, P. 1996. Fatigue damage for asphalt mixtures: a pertinent approach. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.
- Kim, Y.R., Lee, H.J., Little, D.N. 1997. Fatigue Characterization of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.

- Carpenter, S. H., Jansen, M. 1997. Fatigue Behavior Under New Aircraft Loading Conditions. Proceedings of Aircraft Pavement Technology in the Midst of Change.
- Shen, S., Carpenter, S. H. 2007. An Energy Approach for Airport Pavement Low Damage Fatigue Behaviour, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Ghuzlan, K., Carpenter, S. H. 2000. An Energy-Derived/Damage-Based Failure Criteria for Fatigue Testing. Transportation Research Record (TRR), No. 1723, pp. 131-141.
- Shen, S. Carpenter, S. H. 2005. Application of Dissipated Energy Concept in Fatigue Endurance Limit Testing. Journal of Transportation Research Record: Transportation Research Board, No. 1929, pp. 165-173.
- Monismith, C.L., Salam, Y.M. 1972. Distress Characteristics of Asphalt Concrete Mixes, Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists, Vol. 42.
- Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltunen, D., Stoffels, S. M. 1993. Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes, SHRP A-357, National Research Council, Washington, D. C.
- Mello, L.G. 2008. A teoria do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas. Tese de doutoramento. Universidade de Brasília. Brasil.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Minhoto, M.J.C., Fontes, L., Kumar, D.S.N.V.A., Silva, B.T.A. 2009a. The prediction of fatigue life using the k1-k2 relationship, Second Workshop on Four-point Bending, Guimarães, Portugal, 24-25 September.
- Zhou, F., Scullion, Hu, S., Chen, T., Qi, D., Claros, G. 2007. Development and Verification of the Overlay Tester Based Fatigue Cracking Prediction Approach, Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists, Vol. 76.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Minhoto, M.J.C., Fontes, L., Kumar, D.S.N.V.A., Silva, B.T.A. 2009b. Analysis of the variation in the fatigue life through four-point bending tests, Second Workshop on Four-point Bending, Guimarães, Portugal, 24-25 September.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Minhoto, M.J.C., Fontes, L., Kumar, D.S.N.V.A., Silva, B.T.A. 2009c. Application of plateau value to predict fatigue life”, Second Workshop on Four-point Bending, Guimarães, Portugal, 24-25 September.