

REVISTA

**ABPV**

Associação Brasileira de Pavimentação



**PAVIMENTAÇÃO**

Ano IV - Nº 13 - Abr/Mai/Jun de 2009 - [www.abpv.org.br](http://www.abpv.org.br) - ISSN 1809-1865



**Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas**

Manuel J. C. Minhoto  
Jorge Pais



Rua Miguel Couto, 105 – Sobrelojas 204 e 205  
20070-030 – Rio de Janeiro – RJ  
Tel: (21) 2233-2020 / 2263-5794 – Fax: (21) 2233-0709

**CONSELHO EDITORIAL**  
Diretoria da ABPv

COORDENAÇÃO GERAL JORNALISTA RESPONSÁVEL  
Arq<sup>ta</sup> Georgina Libório Azevedo Jean Pierre M. Santiago  
georgina@abpv.org.br MTb 27170-RJ  
redacao@revistapavimentacao.org.br

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO**

Presidente: Eng<sup>o</sup> EDUARDO ALBERTO RICCI  
Vice-Presidente: Cel Eng<sup>o</sup> PAULO ROBERTO DIAS MORALES  
Diretor Administrativo: Eng<sup>o</sup> JOÃO MENESCAL FABRÍCIO  
Diretor Técnico: Eng<sup>a</sup> LAURA M<sup>o</sup> GORETTI DA MOTTA  
Diretor Financeiro: Eng<sup>o</sup> ATAHUALPA SCHMITZ DA SILVA PREGO  
Diretor de Divulgação: Arq<sup>ta</sup> GEORGINA LIBÓRIO AZEVEDO

**COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO**

Eng<sup>o</sup> Alexandre Zupolini Neto; Eng<sup>o</sup> Alfredo Monteiro de Castro Neto; Eng<sup>o</sup> Alvaír Pinto Barbosa; Eng<sup>o</sup> Antônio Fortunato Marcon; Eng<sup>o</sup> Armando Martins Pereira; Eng<sup>o</sup> Armando Morilha Junior; Eng<sup>o</sup> Atahualpa Schmitz da S. Prego; Eng<sup>o</sup> Carlos Yukio Suzuki; Eng<sup>o</sup> Cássio Eduardo Lima de Paiva; Eng<sup>o</sup> Chequer Jabour Chequer; Eng<sup>o</sup> Djalma Rocha A. M. Pereira; Eng<sup>o</sup> Douglas Fadul Villibor; Eng<sup>o</sup> Dulcevir Guerreiro Vilar de Melo; Eng<sup>o</sup> Edinaldo Afonso Marques de Melo; Eng<sup>o</sup> Eduardo Alberto Ricci; Eng<sup>o</sup> Ernesto Simões Preussler; Eng<sup>o</sup> Fernando Augusto Jr.; Eng<sup>o</sup> Francisco Samuel Pithon Barreto; Eng<sup>o</sup> Genésio Almeida da Silva; Arq<sup>ta</sup> Gilda Collet Bruna; Eng<sup>o</sup> Glicério Trichês; Eng<sup>o</sup> Heitor Roberto Giampaglia; Eng<sup>o</sup> Jacques de Medina; Eng<sup>o</sup> João Menescal Fabrício; Eng<sup>o</sup> João Virgílio Merighi; Eng<sup>o</sup> Jorge Augusto Pereira Ceratti; Eng<sup>o</sup> Jorge Henrique Ribeiro; Eng<sup>o</sup> Jorge Paulo Moro; Eng<sup>o</sup> José Franklin Moreira; Eng<sup>o</sup> José Leomar Fernandes Junior; Eng<sup>o</sup> José Pedro dos Santos Vieira Costa; Eng<sup>o</sup> José Tadeu Balbo; Eng<sup>o</sup> Laiz de Souza; Eng<sup>a</sup> Laura M<sup>o</sup> Goretti da Motta; Eng<sup>o</sup> Leni F. M. Leite; Eng<sup>o</sup> Leto Momm; Eng<sup>o</sup> Liedi Legi B. Bernucci; Eng<sup>a</sup> Luciana Nogueira Dantas; Eng<sup>o</sup> Luiz Miguel de Miranda; Eng<sup>o</sup> Marcello Roberto Rangel Pestana; Eng<sup>o</sup> Maria da Conceição M. Azevedo; Eng<sup>o</sup> Márcio Muniz de Farias; Eng<sup>o</sup> Marcílio Augusto Neves; Eng<sup>o</sup> Mario Henrique Furtado Andrade; Eng<sup>o</sup> Nilton de Souza Campelo; Eng<sup>o</sup> Otacílio Alves de França Junior; Eng<sup>o</sup> Paulo Roberto Belisário S. de Souza; Eng<sup>o</sup> Paulo Romeu Assunção Gontijo; Eng<sup>a</sup> Pre-predigna D. E. Almeida da Silva; Eng<sup>o</sup> Rita Moura Fortes; Eng<sup>o</sup> Salomão Pinto; Eng<sup>o</sup> Sílvio Rodrigues Filho; Eng<sup>o</sup> Saul Birman; Eng<sup>o</sup> Walter Canales Sant'ana; Eng<sup>a</sup> Wanda Trigo Loureiro; Eng<sup>o</sup> Washington Pérez Nuñez.

Editoração Eletrônica: MURO Produções Gráficas  
Revisão: Ellis Pinheiro

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda

Tiragem: 5.000 exemplares – Periodicidade: Trimestral



**Nossa capa:**

Pavimento da rodovia  
BR-265 trecho entre  
Barbacena e  
São João Del Rey, MG

Foto: Georgina Libório Azevedo

# Sumário

- 2 Editorial
- 3 Seção de notas

**ARTIGOS TÉCNICOS**

- 6 Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas  
*Manuel J. C. Minhoto e Jorge Pais*
- 14 Avaliação do impacto ambiental sonoro em um trecho urbano de rodovia  
*Elaine Carvalho da Paz e Paulo Henrique Trombetta Zannin*
- 23 Novo critério de dimensionamento de pavimentos de concreto simples para as cargas ambientais e do tráfego  
*Marcos P. Rodolfo e José T. Balbo*
- 34 Utilização de cascalhos de perfuração oriundos da exploração de petróleo em misturas asfálticas  
*Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena, John Kennedy Guedes Rodrigues, Leda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena e Heber Carlos Ferreira*
- 45 Módulo de resiliência a 40°C de misturas asfálticas empregando ligante asfalto-borracha e óleo extensor  
*Fernanda Pilati, Adalberto L. Faxina, Glauco T. P. Fabbri, Manoel H. A. Sória, Antonio C. Gigante e Leni F. M. Leite*

**FATOS HISTÓRICOS**

- 56 Artigo do Eng<sup>o</sup> Thenn de Barros no Boletim Informativo da ABPv

Este espaço destina-se à publicação de artigos encaminhados à Revista pelos profissionais que se dispõem a colaborar promovendo com os demais técnicos o debate de diversos temas atuais e relevantes. Os artigos devem ser enviados para [redacao@revistapavimentacao.org.br](mailto:redacao@revistapavimentacao.org.br) de acordo com as normas vigentes no sítio [www.revistapavimentacao.org.br](http://www.revistapavimentacao.org.br).

Os trabalhos são apresentados na íntegra, sendo de responsabilidade do autor toda a informação nele contida.

# Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas

**Manuel J. C. Minhoto**

Professor Adjunto – Instituto Politécnico de Bragança, Portugal  
[minhoto@ipb.pt](mailto:minhoto@ipb.pt)

**Jorge Pais**

Professor Auxiliar – Universidade do Minho, Portugal  
[jpais@civil.uminho.pt](mailto:jpais@civil.uminho.pt)

## RESUMO

Os pavimentos rodoviários estão sujeitos à ação combinada do tráfego e das variações de temperatura que os conduzem a diversos tipos de degradações, destacando-se o fendilhamento como uma das principais, constituindo uma preocupação dos organismos rodoviários atrasar ou, quando possível, evitar a ocorrência de fendilhamento nos pavimentos flexíveis. O reforço de pavimentos constitui uma técnica de conservação estrutural e funcional integrante das estratégias de conservação mais utilizadas na reabilitação de pavimentos, quando a reposição da capacidade estrutural dos pavimentos é o principal objetivo. No entanto, tem-se constatado que o desempenho dos pavimentos constituídos por uma camada de reforço aplicada sobre um pavimento fendilhado mobiliza um mecanismo de resistência conducente a um tipo particular de ruína, caracterizado pela propagação das fendas do pavimento existente para as camadas de reforço, designado por reflexão de fendas. Esse mecanismo constituiu a principal motivação para a realização de um estudo, que aqui sucintamen-

te se apresenta, objetivando a avaliação do efeito das variações de temperatura, isoladas e combinadas com o tráfego, na ocorrência da reflexão de fendas. As conclusões obtidas neste estudo resultam da análise e tratamento do resultado da simulação numérica do comportamento à reflexão de fendas de um reforço de pavimento, para diversas situações de carregamento e tendo como base o método dos elementos finitos. Deduz-se que a ocorrência de variações de temperatura num reforço de pavimento contribui para o agravamento da propagação de fendas, conduzindo à ruína prematura do pavimento reforçado. No sentido de melhorar o desempenho destas soluções, conclui-se pela necessidade de, na concepção de um reforço de pavimento, se considerar a inclusão do efeito das variações de temperatura na avaliação do seu comportamento à reflexão de fendas.

## PALAVRAS-CHAVE

Reforço de pavimentos, reflexão de fendas, variações de temperatura, tráfego, misturas betuminosas.

## 1. INTRODUÇÃO

Na maioria das redes rodoviárias, a estratégia de conservação considerada mais adequada para situações de reabilitação estrutural de pavimentos baseia-se na aplicação de camadas de reforço estrutural sobre os pavimentos degradados. No entanto, constata-se que, na maioria dos casos, o desempenho desses reforços não corresponde ao esperado, verificando-se ocorrer a transmissão do fendilhamento, existente nas camadas degradadas, para as camadas de reforço, conduzindo ao fendilhamento prematuro na sua base e a consequente propagação para a superfície. Este fenômeno, designado por reflexão de fendas, ocorre principalmente como resultado da combinação do carregamento cíclico do tráfego com o efeito mecânico das variações de temperatura (HALIM, 1989).

A ocorrência de variações de temperatura nos pavimentos, resultantes das variações diárias da temperatura do ar, induz movimentos horizontais de abertura e fecho das fendas existentes no pavimento como resultado de um fenômeno de retração térmica, contribuindo para um agravamento do estado de tensão no reforço (DE BONDT, 2000), em zonas próximas da frente das fendas, constituindo uma causa importante para a propagação do fendilhamento nessa camada (MINHOTO, 2005). A sobreposição de um estado de tensão de origem térmica com o estado de tensão resultante do efeito da passagem de um rodado de um veículo agrava o estado de tensão global no reforço e conduz à ocorrência da reflexão de fendas (MINHOTO *et al*, 2005).

Neste artigo apresenta-se resumidamente um estudo sobre a influência das variações de temperatura no comportamento à reflexão de fendas de um reforço de pavimento, objetivando um caso concreto de um pavimento, sujeito ao carregamento térmico e do tráfego, observados durante um ano (MINHOTO, 2005). Pretende contribuir-se para um melhor entendimento sobre o comportamento dos reforços de pavimentos à reflexão de fendas, quando sujeitos à ação conjunta das variações de temperatura e do tráfego, e estudar as diferenças de comportamento entre duas misturas betuminosas, uma mistura convencional e uma mistura com betume modificado com borracha (BMB).

## 2. ÂMBITO DO ESTUDO

O estudo que se apresenta envolveu a simulação numérica do comportamento à reflexão de fendas de um pavimento reforçado, pertencente à rede rodoviária fundamental portuguesa e situado no nordeste de Portugal. Essa simulação baseou-se no uso da metodologia dos elementos finitos para modelação do comportamento do pavimento reforçado e considerou como solicitações a ação do tráfego e a ação das variações de temperatura. As solicitações adotadas foram as observadas durante o período de um ano e compreendem a distribuição de temperaturas horárias a várias profundidades do pavimento (gradientes térmicos) e os valores do tráfego (volumes e agressividade) observado.

A simulação do comportamento do pavimento consistiu na avaliação dos estados de tensão e de extensão resultantes da aplicação mecânica das solicitações consideradas, o que permitiu avaliar a resistência do reforço do pavimento à reflexão de fendas para as seguintes situações de carregamento: a) tráfego; b) variações de temperatura; c) tráfego conjugado com as variações de temperatura.

A simulação horária do comportamento do pavimento foi realizada com base no uso de modelos numéricos, desenvolvidos para avaliação do estado mecânico do pavimento, tendo por base o pavimento observado (características geométricas, condições de ligação entre camadas e de discretização do domínio geométrico, mecânico e térmico) e atendendo ao efeito de cada ação, estruturados para funcionarem como: 1) modelo térmico para definição horária do estado térmico do pavimento, resultante das condições climáticas do local; 2) modelo mecânico de avaliação do efeito da ação do tráfego; 3) modelo mecânico de avaliação do efeito das variações de temperatura.

A avaliação da resistência do reforço de pavimento baseou-se na avaliação, horária, da vida previsível do reforço de pavimento. A vida previsível do reforço, numa determinada hora, foi avaliada em função dos níveis médios de extensão de Von Mises acima da fenda, relacionando-os com a resistência à fadiga das misturas envolvidas no reforço. A estimativa de vida previsível

do reforço permitiu determinar a evolução horária do dano sofrido pelo reforço do pavimento ao longo do ano.

### 3. MODELOS NUMÉRICOS DE COMPORTAMENTO

A definição numérica da geometria das camadas do pavimento é representativa das espessuras das camadas *in situ*, obtidas por análise de carotagens do pavimento no qual foram observadas as temperaturas. As espessuras das camadas do modelo são: reforço de pavimento, 0.125m, camada betuminosa fendilhada, 0.215m, camada granular, 0.30m, e camada representativa da fundação, 1.6m. O modelo numérico inclui uma fenda, localizada na camada fendilhada do pavimento antigo à qual é atribuída uma largura de 10mm.

A discretização mecânica do modelo baseou-se na adoção de um elemento finito do tipo sólido de oito nós, de interpolação linear, que conduziu à malhagem, que se apresenta na Figura 1. Esse elemento apresenta três graus de liberdade em cada nó, traduzidos em translações nodais nas direcções x, y e z.

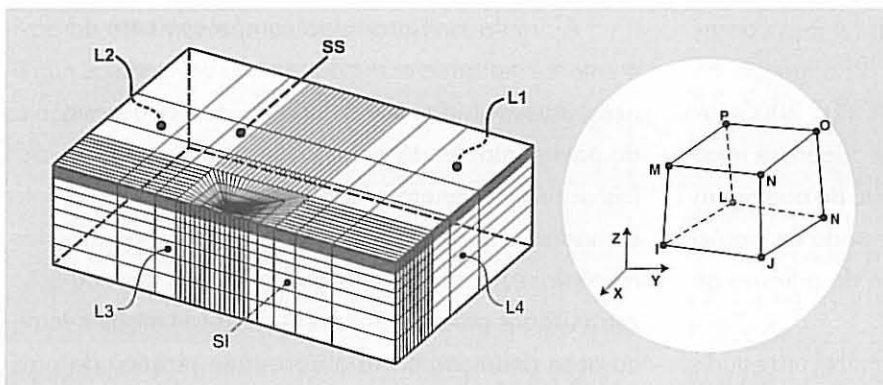


Figura 1 – Discretização do modelo mecânico com um elemento finito de oito nós

#### 3.1 Solicitações

Ao modelo descrito aplicam-se duas ações: tráfego e variações de temperatura. A simulação do carregamento do tráfego envolve a aplicação de uma carga, de um rodado duplo com eixo de 130kN, com a configuração apresentada na Figura 2, considerada distribuída na superfície do pavimento. Para efeitos de avaliação de dano, a caracterização do tráfego baseou-se nos registros de contagens de tráfego realizadas num

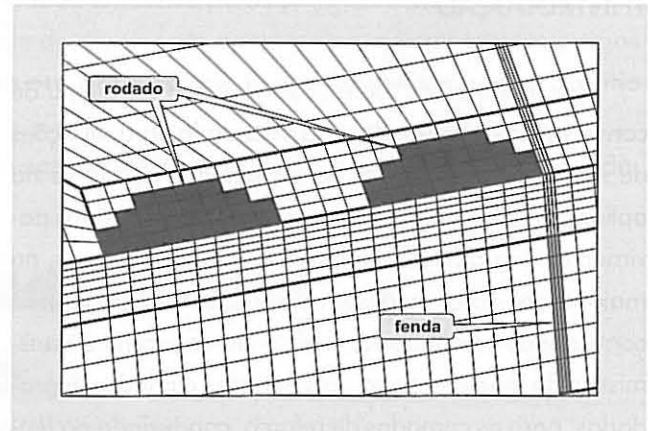


Figura 2 – Esquema da carga distribuída representativa de um rodado duplo

posto fixo de medição de tráfego, próximo do local de observação das temperaturas.

#### 3.2. Modelos desenvolvidos

A ação do tráfego foi considerada como uma carga de curta duração mobilizando o comportamento elástico-linear dos materiais betuminosos. Neste caso, a análise numérica é do tipo estacionário e realizada para cada hora de vida em serviço, à qual corresponde um estado térmico

observado. A temperatura observada nos pavimentos apresenta variações horárias, consideradas de longa duração quando comparadas com a duração da aplicação da carga de um eixo. Como tal, o modelo para simulação das variações de temperatura foi considerado transiente, de longa duração, realizando a integração do estado de tensão e de extensão para intervalos horários ao longo do período de

tempo de 24 horas. Este processamento mobiliza essencialmente fenômenos da retração térmica com resposta viscoelástica (relaxação) dos materiais betuminosos.

#### 3.3. Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais integrantes da camada de reforço foram obtidas por ensaios laboratoriais de fadiga à flexão em quatro pontos. As propriedades dos materiais das camadas existentes do pavimento a refor-

gar resultaram de uma caracterização do pavimento existente. Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades elásticas das misturas betuminosas (módulo dinâmico e coeficiente de Poisson), para uma gama de temperaturas, entre -5°C e +25°C, e para uma frequência de 10Hz. As propriedades elásticas adotadas para o material da camada fendilhada são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Propriedades das misturas betuminosas

T (°C)	Mistura com BMB		Mistura convencional	
	E (MPa)	Coef. Poisson	E (MPa)	Coef. Poisson
-5	4440	0.35	16160	0.35
5	3220	0.35	13560	0.35
15	1950	0.35	9300	0.35
25	1110	0.35	4780	0.35

Tabela 2 – Propriedades da mistura betuminosa da camada fendilhada

T (°C)	E (MPa)	Coef. Poisson
-5	12000	0.35
0	9000	0.35
5	6500	0.35
10	4000	0.35
15	2500	0.35
25	680	0.35

Na Tabela 3, apresentam-se as propriedades dos materiais da camada de base granular e da camada de fundação, obtidas a partir de um estudo de reabilitação do pavimento em estudo.

Tabela 3 – Propriedades da camada granular e do solo de fundação

Designação	E (MPa)	Coef. Poisson
Camada de base granular	100	0.3
Solo de fundação	50	0.35

Na avaliação do estado de tensão/extensão devido ao efeito das variações de temperatura, considerou-se a termoviscoelasticidade das misturas betuminosas, incluindo, assim, o efeito de relaxação, ou fluência, das misturas perante a retração térmica. As propriedades viscoelásticas das misturas, determinadas experimentalmente, foram

expressas por funções de relaxação  $G(t)$  (corte) e  $K(t)$  (volumétrico), representadas por séries de Prony, de acordo com as seguintes expressões (ANSYS, 1999):

$$G = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \quad (1)$$

$$K = K_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_K} K_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^K}\right) \quad (2)$$

O número de elementos da série de Prony adotados,  $n_G$  e  $n_K$ , foi de três, resultando 14 parâmetros das expressões de Prony, (7 de corte (G); 7 – volumétricos (K)). Atendendo ao caráter térmico da simulação, considerou-se a aplicação do princípio da simplicidade termorreológica aos materiais adotados, por intermédio da aplicação do fator de escala  $A(T(t))$  de William-Landel-Ferry (WLF) de acordo com a expressão (3) (ANSYS, 1999).

$$\log_{10}(A(T(\tau))) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (3)$$

As propriedades viscoelásticas, obtidas a partir de ensaios laboratoriais, conduziram ao estabelecimento dos parâmetros constantes na Tabela 4.

A realização de ensaios de retração térmica livre conduziu à obtenção dos valores do coeficiente de retração térmica para cada tipo de mistura usada na simulação, os quais se apresentam na Tabela 5.

#### 4. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

A simulação numérica visou avaliar o comportamento mecânico do pavimento perante à ação combinada das variações de temperatura e do tráfego e envolve quatro fases: a) avaliação do estado de tensão/extensão devido ao tráfego; b) avaliação do estado de tensão/extensão devido às variações de temperatura; c) avaliação do estado de tensão/extensão da combinação das duas ações; d) determinação da vida previsível do reforço e do dano associado às ações.

As três primeiras fases permitem a obtenção de estados de tensão/extensão nos nós da zona ativa e crítica do reforço, situados acima da frente de uma fenda. O ciclo elementar de simulação é horário, mesmo em soluções

Tabela 4 – Propriedades viscoelásticas das misturas betuminosas – Parâmetros de Prony

	Parâmetros	Mistura com BMB	Mistura convencional		Parâmetros	Mistura com BMB	Mistura convencional
Parâmetros volumétricos	$K_{\infty}$	1.379E+01	2.807E+01	Parâmetros de corte	$G_{\infty}$	5.108E+00	1.039E+01
	$K_1$	5.623E+02	7.845E+02		$G_1$	2.091E+02	2.894E+02
	$K_2$	1.116E+02	2.598E+02		$G_2$	4.134E+01	9.445E+01
	$K_3$	2.390E+01	3.071E+01		$G_3$	8.852E+01	1.135E+01
	$\tau_1^K$	6.054E-02	5.853E-01		$\tau_1^G$	6.032E-02	5.991 E-01
	$\tau_2^K$	1.474E+01	9.165E 00		$\tau_2^G$	1.473E+01	9.489E+00
	$\tau_3^K$	9.863E+03	9.922E+03		$\tau_3^G$	9.862E+03	9.999E+03
WLF	$T_r$	1.384E+01	13.114544				
	$C_1$	2.228E+07	2.557E+07				
	$C_2$	1.438E+08	1.395E+08				

Tabela 5 – Coeficientes de retracção térmica das misturas betuminosas

Parâmetro	Mistura com BMB	Mistura convencional
$\alpha$	$4.268 \times 10^{-05}$	$3.542 \times 10^{-05}$

numéricas transientes, considerando ciclos diários, como é o caso das variações de temperatura.

As duas primeiras fases requerem o funcionamento prévio do modelo térmico com o objetivo de determinar as temperaturas horárias em todos os nós do modelo, para um período de 24 horas a partir das temperaturas observadas. A avaliação do estado de tensão no reforço devido ao tráfego é realizada após a consideração das temperaturas no domínio mecânico no sentido de estabelecer as propriedades termomecânicas dos materiais. As temperaturas horárias nos nós do modelo constituem a principal solicitação térmica a que o pavimento está sujeito, permitindo a avaliação do estado de tensão/extensão no pavimento (por meio do modelo transiente), em virtude da ação exclusiva das variações de temperatura.

As componentes do estado de tensão/extensão obtidas para os dois casos de carregamento permitem, na fase seguinte, determinar o estado de tensão/extensão correspondente à combinação dos efeitos dos dois tipos de carregamento. As componentes do estado de tensão/extensão obtidas permitem a avaliação da vida previsível

do reforço, realizada com base em leis de fadiga conseguidas em laboratório com ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos. A vida previsível à reflexão de fendas é relacionada com o tráfego observado, permitindo estimar o dano acumulado ao longo do período em análise.

#### 4.1. Avaliação do dano

A avaliação do dano horário associado à reflexão de fendas é realizada com base na adoção da metodologia de concepção de reforços de pavimento proposta por Sousa *et al.* (2002). Para cada tipo de mistura betuminosa, para cada hora de análise e para cada situação de carregamento, a avaliação do dano envolve: 1) determinação das extensões de Von Mises; 2) determinação da extensão de Von Mises média,  $\epsilon_{VM}$ , na zona do reforço, acima da frente da fenda; 3) determinação da vida previsível do reforço; 4) determinação do dano. Assim, em cada nó, localizado acima da fenda (Figura 3), foi calculada, para cada caso de carregamento, a extensão de Von Mises por intermédio da expressão (SOUSA *et al.*, 2002):

$$\epsilon_{VM} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{1}{2}((\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2)} \quad (4)$$

onde:  $\epsilon_{VM}$  = extensão de Von Mises;

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  = extensões principais.

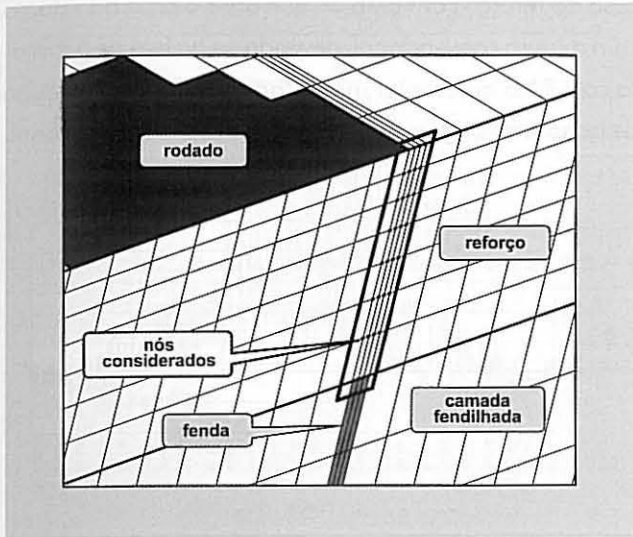


Figura 3 – Nós considerados para a avaliação da extensão média de Von Mises

Com base nos valores de  $\epsilon_{VM}$  em cada nó, foi calculada a extensão de Von Mises média nos nós localizados na zona acima da fenda (Figura 3). A  $\epsilon_{VM\text{ média}}$  foi, em seguida, usada numa expressão adotada para a avaliação do número de eixos admissível, definida em função da temperatura e da extensão de Von Mises. Para relacionamento da resistência à reflexão de fendas com a extensão de Von Mises, foi utilizada a seguinte relação (MINHOTO, 2007):

$$\epsilon_{VM} = [(a \times n) + b] \times E^c \times N^d \quad (5)$$

onde:  $n$  = porosidade da mistura (%);

$E$  = rigidez da mistura, função da temperatura,  $T$ , expressa em (Pa);

$N$  = número de repetições de carga admissível;

$a, b, c, d$  = parâmetros experimentais de fadiga das misturas (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros adimensionais para a expressão da fadiga

Tipo de material	a	b	c	d
Mistura convencional de desgaste	1.009	0.928	-0.337	-0.252
Mistura com betume modificado com borracha	1.957	0.926	-0.434	-0.144

A partir do número de eixos admissíveis conseguidos no procedimento anterior e usando o número de eixos

observados *in situ*, foi obtido o rácio da resistência gasta em cada hora, designado por dano, cuja expressão adotada apresenta a seguinte forma (MINHOTO, 2007):

$$D_{h,e} = \frac{N_{h,e}}{N_{adm,h,e}} \quad (6)$$

onde:  $D_{h,e}$  = dano horário do eixo e durante a hora  $h$ ;

$N_{h,e}$  = número de passagens de um eixo e observados na hora  $h$ ;

$N_{adm,h,e}$  = número de passagens admissíveis, de um eixo e na hora  $h$ .

Para cada hora de análise, é obtido um número de parcelas de "dano" correspondente ao número de tipos de eixos considerados. O dano total horário é obtido a partir da soma de todas as parcelas de dano obtidas para a hora "h".

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Da simulação realizada obtiveram-se resultados que permitem analisar o comportamento do reforço, sob o ponto de vista de relações entre o estado de extensão

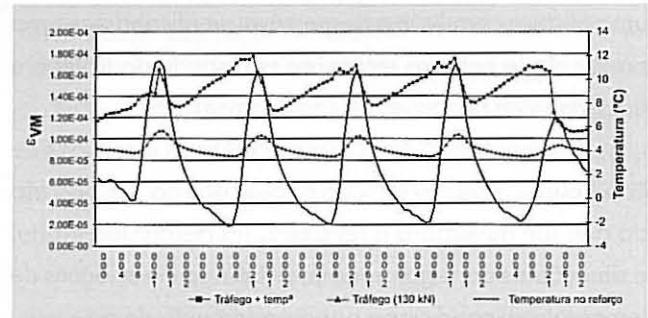


Figura 4 – Variação da extensão de Von Mises com a temperatura, para dias frios, no reforço em mistura com BMB

(expresso pela  $\epsilon_{VM\text{ média}}$ ) e o seu estado térmico, representado pela temperatura média, e sob o ponto de vista

da análise do dano associado a cada carregamento. A Figura 4 apresenta a evolução de  $\epsilon_{VM\text{ média}}$  com a variação de temperaturas, em dias tipicamente frios. Verifica-se, para  $\epsilon_{VM}$ , uma tendência contrária à evolução da temperatura, ou seja, o arrefecimento conduz ao aumento da

extensão de Von Mises, em qualquer material. Nestes casos, as  $\epsilon_{VM}$  por causa das variações de temperatura,



apresentam valores da ordem de grandeza das resultantes do tráfego, o que constitui um motivo para a sua consideração num processo de concepção de um reforço.

Na Figura 5, apresenta-se a evolução da extensão de Von Mises com as variações de temperatura, em dias tipicamente quentes. Neste caso, verifica-se uma influência da temperatura na evolução do estado de extensão de Von Mises no caso da ação ao tráfego, devido à influência da temperatura nas variações do módulo de rigidez das misturas betuminosas. O efeito das variações de temperatura no estado de extensão total no reforço constituído por

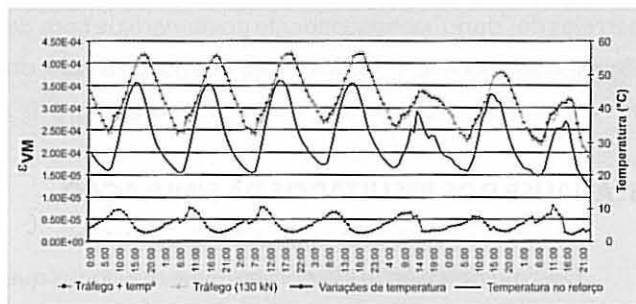


Figura 5 – Variação da extensão de Von Mises com a temperatura, para dias quentes, no reforço em mistura com BMB

uma mistura com BMB é desprezável, verificando-se uma proximidade entre as extensões em virtude do tráfego e das extensões por causa do carregamento total.

Considerando a evolução anual das extensões de Von Mises (Figuras 6 e 7), verifica-se que no período frio do ano (de novembro a fevereiro, no Hemisfério Norte) a situação de carregamento total (tráfego + variações de temperatura) condiciona o comportamento do pavimento, exibindo extensões de Von Mises superiores às da situação do tráfego. No período quente (de março a outubro, no Hemisfério Norte), constata-se que o carregamento devido ao tráfego conduz ao estado de extensão mais gravoso, apresentando o carregamento total, extensões de Von Mises, de valor considerável. Conclui-se, assim, que o efeito das variações de temperatura deve ser considerado em todo o período de análise, principalmente nos períodos frios do ano, nos quais a diferença entre o efeito do tráfego e o efeito do conjunto do tráfego e da temperatura é mais acentuada.

Nas Figuras 6 e 7, constata-se ainda que a diferença entre o carregamento total e o do tráfego é menor para o

caso do reforço com BMB do que para o caso do reforço com mistura convencional, devendo-se ao fato de a mistura com BMB apresentar maior capacidade de dissipação de tensões de origem térmica que a mistura convencional.

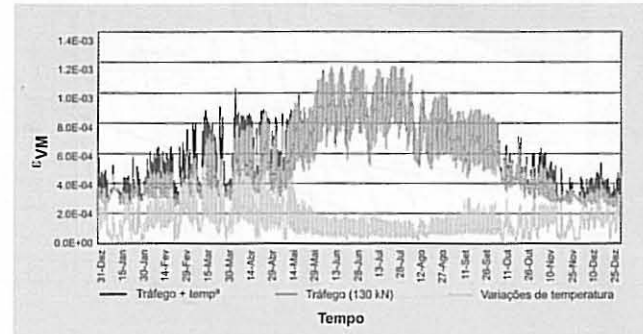


Figura 6 – Extensões de Von Mises anuais no reforço com mistura com BMB

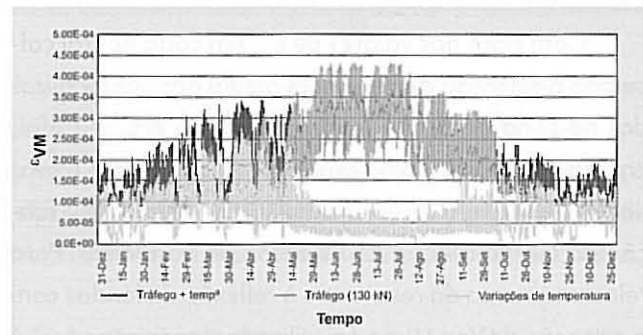


Figura 7 – Extensões de Von Mises anuais no reforço com mistura convencional

A Figura 8 apresenta o dano horário ao longo do ano, devido ao efeito do tráfego, no reforço constituído por mistura betuminosa com BMB, verificando-se que, durante os meses quentes do ano, esse dano horário é relevante, sendo até superior ao observado nos meses frios. A Figura 9 apresenta o aspecto do gráfico da evolução do dano por causa das ações do tráfego e total, constatando-se que o dano em virtude do carregamento total é sempre superior ao causado apenas pelo tráfego. As conclusões obtidas são igualmente aplicáveis no caso de um reforço ser constituído por uma mistura convencional.

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho considerou-se o fenômeno da reflexão de fendas como uma das principais causas do fendilhamento prematuro dos reforços de pavimentos. Esse

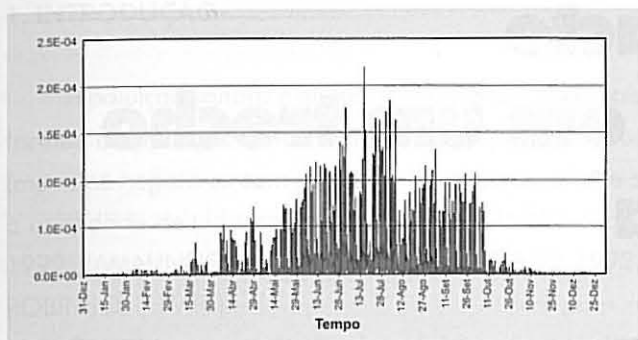


Figura 8 – Dano horário por causa do carregamento do tráfego no reforço com BMB

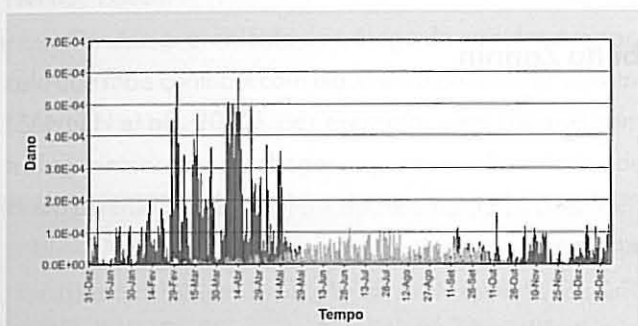


Figura 9 – Dano horário, devido ao carregamento total e ao do tráfego, num reforço com mistura com BMB

fenômeno deve-se, sobretudo, à elevada concentração de tensões na zona acima das fendas das camadas existentes, provocadas pelos movimentos dos seus bordos, resultantes da ação do tráfego e das variações de temperatura. Concluiu-se que o efeito conjugado do tráfego e das variações de temperatura, em termos de reflexão de fendas, constitui a ação mais desfavorável.

A variação horária do estado térmico do pavimento apresenta uma influência significativa na variação do seu estado de tensão e de extensão, qualquer que seja o carregamento considerado. Com a redução da temperatura média no reforço (arrefecimento), o estado de tensão e

de extensão horários agrava-se, como resultado da retração térmica, qualquer que seja o material constituinte da camada de reforço.

No período mais frio do ano, a situação de carregamento conjugado do tráfego e das variações de temperatura condiciona o comportamento do reforço do pavimento, exibindo extensões de Von Mises muito maiores do que as do tráfego, considerado isoladamente, verificando-se que as extensões devido às variações de temperatura apresentam valores mais altos do que as do tráfego, considerado isoladamente.

No período mais quente do ano, o carregamento total condiciona igualmente o fenômeno de reflexão de fendas. No entanto, é neste período do ano que o estado de extensão por causa do efeito do tráfego assume valores mais elevados, ao contrário do carregamento térmico, apresentando valores muito superiores aos do dano observado nos meses frios, sendo, no entanto, inferiores aos valores do dano associados ao carregamento total.

Neste estudo conclui-se ainda que o período de tempo em que ocorrem valores consideráveis do dano em virtude da ação do carregamento total é superior ao período de tempo no qual ocorrem valores consideráveis do dano associados à situação de carregamento apenas do tráfego, indicando que, na concepção de reforços de pavimentos, o efeito conjunto do tráfego e das variações de temperatura deve ser considerado como a situação de carregamento mais desfavorável.

Em termos de desempenho dos materiais, verifica-se que um reforço constituído por uma mistura betuminosa com BMB apresenta estados de extensão mais favoráveis que os resultantes para um reforço com mistura betuminosa convencional.

## REFERÊNCIAS

1. ABD EL HALIM, A.O. A New Approach Toward Understanding the Problem of Reflective Cracking. Proceedings of the First International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, 1989.
2. ANSYS – computer program. 1999. ANSYS, Inc, Theory Reference – Realise 8.0. Edited by Peter Kohnke. ANSYS Inc. Canonsburg.
3. DE BOND TARIAN. Effect of Reinforcements Properties. Proceedings PRO11. 4<sup>th</sup> International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Edited by A. O. Abd El Halim, D. A. Taylor and El H. H. Mohamed. RILEM. Ottawa, Ontario, Canada. March 2000.
4. MINHOTO, Manuel J. C. “Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis”. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Portugal, 2005.
5. MINHOTO, Manuel J. C., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A.A. & Picado-Santos, Luis G. “Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Model”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board n<sup>o</sup> 1919 – Rigid and Flexible Pavement Design 2005. pp 96-110. TRB. Washington DC. 2005.
6. SOUSA, Jorge B., PAIS, Jorge C., Saim, Rachid, Way, George & Stubstad, Richard N. Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking, Journal of the Transportation Research Board, 2002.