

IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço

Fortaleza/CE - BRASIL - 07 a 09 de outubro 2009

CONSIDERAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM CAMADAS DE REFORÇO COM MISTURAS COM ASFALTO-BORRACHA

Liseane Fontes¹; Glicério Trichês²; Paulo Pereira³ & Jorge Pais⁴

RESUMO

A restauração de pavimentos flexíveis trincados através da execução de uma camada de reforço ou da fresagem parcial do revestimento existente e a colocação de uma camada asfáltica convencional são soluções frequentemente adotadas pelos órgãos rodoviários brasileiros. No entanto, tal prática tem mostrado que nem sempre o objetivo proposto é alcançado, uma vez que a camada executada não atinge a vida de projeto prevista devido ao aparecimento prematuro de trincas que têm como origem a propagação das trincas existentes no revestimento antigo. Assim, em pavimentos em que o trincamento predominantemente ocorre de baixo para cima, com a fresagem parcial do revestimento a patologia não é de todo eliminada. Desta forma, ao se executar uma camada de revestimento novo sobre esta superfície, as trincas existentes se comportam como pontas de uma trinca. A elevada concentração de tensões na extremidade das trincas existentes, provocadas pelos movimentos dos seus bordos, é resultante das seguintes ações: (i) tráfego, (ii) variações de temperatura; (iii) variações de umidade no subleito; (iv) qualidade de construção. Para mitigar o problema da propagação de trincas, várias soluções têm sido pesquisadas em diversos países. Dentre elas, misturas asfálticas modificadas com asfalto-borracha têm sido desenvolvidas com o objetivo de inibir a propagação de trincas, além de retardar o aparecimento de patologias como o trincamento por fadiga e o afundamento, comumente encontradas em rodovias brasileiras. No presente trabalho apresenta-se uma simulação numérica utilizando um modelo de propagação de trincas, através de técnica de elementos finitos, para avaliar o dano provocado em uma camada de reforço de um pavimento devido à ação do tráfego e das variações de temperatura. O modelo determina os níveis de extensão desviatória de Von Mises a que uma camada de reforço fica submetida quando assente sobre uma superfície trincada e, utilizando-se as leis de fadiga das misturas pesquisadas, obtidas no ensaio de fadiga por flexão alternada em 4 pontos, avalia-se a vida de fadiga desta camada em termos de seu trincamento. Os resultados mostraram que as misturas com asfalto-borracha prolongam consideravelmente a vida da camada de reforço, em termos de propagação de trincas, em relação a uma mistura convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Propagação de trincas; Asfalto-borracha; Vida de fadiga.

ABSTRACT

The rehabilitation of cracked flexible pavements by applying an overlay or by milling part of the existing surface layer and then applying a new conventional asphalt layer are solutions frequently adopted by the Brazilian road administration. However, such practice has shown that the proposed objective is not always attained, once that the new

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil – PPGEC, Rua: João Pio Duarte Silva, s/n Caixa Postal 476 Córrego Grande, Florianópolis – SC, 88015-230, Brasil, lisefontes@matrix.com.br

² Departamento de Engenharia Civil – PPGEC, Rua: João Pio Duarte Silva, s/n, Caixa Postal 476 Córrego Grande, Florianópolis – SC, 88015-230, Brasil, ecv1gtri@ecv.ufsc.br

³ Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, ppereira@civil.uminho.pt

⁴ Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, jpais@civil.uminho.pt

layer does not reach the project life due to the premature appearance of cracks originated in old ones. In pavements in which bottom up cracking occurs, a partial surface milling don't eliminate the pathology. Therefore, when a new layer is placed on a pavement surface, the existing cracks behave as crack tips. The high concentration of tensions in the crack tips, coming from the movements of their faces, is the result of: (i) traffic, (ii) temperature variations; (iii) humidity variations of the subgrade; (iv) quality of construction. To mitigate the crack propagation, several solutions have been studied. Asphalt rubber mixtures have been developed aiming at reducing crack propagation and at delaying fatigue cracking and rutting. This work presents the results of a numeric simulation using finite elements for crack propagation is presented with the aim of evaluating the damage due to traffic and temperature variations in an overlay. The model determines the levels of the Von Misses strain to which an overlay is submitted. The life cycle of a pavement is estimated by using the values of the fatigue laws of the tested mixtures, both obtained through 4 point-bending fatigue tests. The results showed that the asphalt rubber mixtures are capable of extending considerably the life of the overlays in terms of crack propagation, when compared to the conventional mixture used in Brazil.

KEY WORDS: Crack propagation; Asphalt rubber; Fatigue life.

1. INTRODUÇÃO

Em pavimentos rodoviários flexíveis, o trincamento da camada de desgaste (mistura asfáltica) deve-se ao dano acumulado produzido pela repetição do carregamento em ciclos de carga-descarga e que leva o material à ruptura. A trinca (ou fenda) é uma degradação na superfície do pavimento que tende a enfraquecer a camada de desgaste, permitindo a entrada da água e provocando um enfraquecimento adicional da estrutura (redução do módulo de rigidez das camadas granulares e subleito).

No dimensionamento de reforços de pavimentos deve-se ter em conta a ocorrência de camadas existentes com elevada densidade e severidade de trincamento. A existência de trincas ativas não tratadas no pavimento existente terá como resultado a propagação destas para as camadas do reforço.

Nos anos mais recentes, o uso da metodologia dos elementos finitos para análise estrutural, com vista à concepção de pavimentos e reforços, tem sido uma alternativa popular por parte dos engenheiros e investigadores. O sucesso desta metodologia está fortemente relacionado com a grande capacidade de processamento e de memória que os computadores passaram a ter nos últimos anos. A análise por elementos finitos tem sido usada para modelação quer do início quer da progressão de uma trinca (Minhoto, 2007).

As misturas asfálticas com asfalto-borracha têm sido empregadas em diversos países devido a sua capacidade de inibição de propagação de trincas. Neste contexto, neste trabalho foi conduzida uma investigação de modo a avaliar a propagação de trincas neste tipo de mistura, através de uma simulação numérica em um programa de elementos finitos.

A simulação numérica foi realizada utilizando os modelos de propagação de trincas desenvolvidos por Minhoto (2007), incorporado ao programa de elementos finitos ANSYS 10.0 (*Multiphysics*), para avaliar o dano na camada de reforço de um pavimento devido ao efeito do tráfego e das variações de temperatura. Os modelos determinam o nível de extensão desviatória de Von Mises a que o reforço do pavimento está submetido e, utilizando a lei de fadiga da mistura obtida nos ensaios da fadiga por flexão alternada em 4 pontos, é avaliada a vida útil do reforço do pavimento e o dano relativamente a um determinado tráfego atuante.

2. FENÔMENO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

A propagação de trincas em camadas reabilitadas é iniciada por uma descontinuidade existente nas camadas subjacentes que se refletem na superfície da camada de desgaste nova devido aos

movimentos da trinca. De acordo com Trevino *et al.* (2003), as descontinuidades são devidas ao seguinte: (i) trincas ou juntas da camada subjacente; (ii) trincas com baixa temperatura na superfície da camada asfáltica antiga; (iii) tipo bloco propagadas a partir da superfície da camada asfáltica antiga; (iv) trincas longitudinais da camada asfáltica antiga; (v) trincas de fadiga da camada asfáltica antiga.

A ocorrência prematura do trincamento na superfície do pavimento rehabilitado deve-se principalmente ao fato de qualquer trinca ou junta, existente no pavimento antigo, tender a evoluir ou a propagar-se através da camada de reforço. Como mostrado na Figura 1, as trincas iniciam-se e propagam-se em zonas de concentração de tensões, causadas pela existência de trincas no pavimento existente ou por defeitos de produção da camada de reabilitação (adaptado de Vanelstraete & de Bondt, 1997).

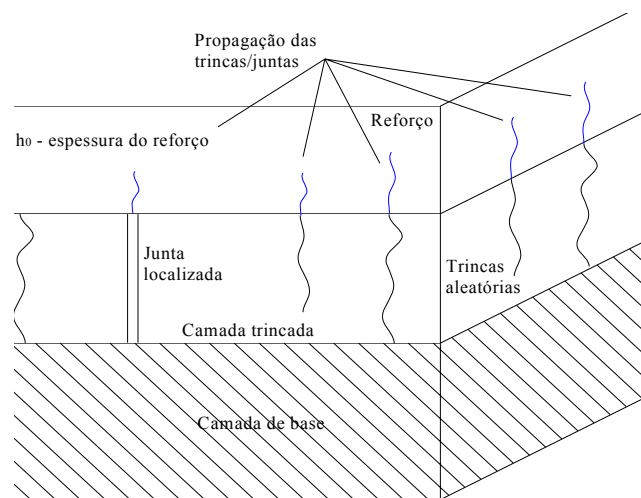


Figura 1. Pavimento trincado rehabilitado com uma mistura betuminosa (adaptado de Vanelstraete & de Bondt, 1997)

Para a compreensão do fenômeno da propagação das trincas é preciso identificar as solicitações susceptíveis de provocar os movimentos dos seus bordos, bem como proceder à quantificação desses movimentos.

Os tipos de solicitações susceptíveis de provocar movimentos nos bordos das trincas, produzindo abertura e fechamento das trincas e, conseqüentemente, um potencial de propagação de trincas (Colombier, 1997) são os seguintes: (i) ação do tráfego; (ii) ação das variações de temperatura; (iii) ação resultante dos movimentos de expansão/retração das camadas cimentadas; (iv) ação resultante dos movimentos de expansão/retração do subleito.

Os movimentos dos bordos de uma trinca podem ser decompostos nos três movimentos elementares segundo o esquema clássico de Irwin (1957), apresentados na Figura 2, definidos pelos seguintes modos de abertura de trincas: (i) modo I que corresponde a uma abertura/fechamento da trinca; (ii) modo II que corresponde a uma deformação por cisalhamento normal à trinca; (iii) modo III que corresponde a uma deformação por cisalhamento paralelo à trinca.

O modo I consiste em um movimento resultante de uma ação de abertura de trinca perpendicular ao seu plano, sendo associado à ocorrência de tensões de tração como resultado, por exemplo, de fenômenos de retração térmica devido a variações de temperatura ou à retração do subleito resultante da secagem do mesmo, ou ainda associado ao fenômeno de flexão devido à passagem do rodado de um veículo pesado. O modo II corresponde à ocorrência de trincamento resultante de um

movimento de cisalhamento puro, sendo associado a tensões de cisalhamento que se desenvolvem na camada de reforço quando o rodado de um veículo pesado atravessa uma trinca transversal ou ainda quando a carga é aplicada em um dos lados da trinca. O modo III é resultante do movimento de cisalhamento paralelo à trinca (ato de rasgar) sendo associado ao crescimento de uma trinca longitudinal.

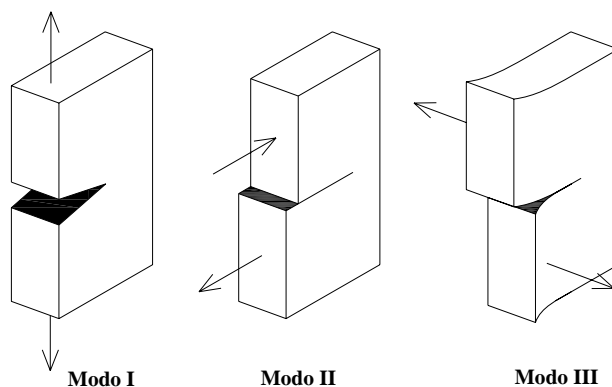


Figura 2. Deslocamentos sofridos pelos bordos de uma trinca (adaptado de Irwin 1957)

Os movimentos dos bordos das trincas apresentam durações diferentes consoante os tipos de solicitações que as provocam, podendo variar desde muito lentos a muito rápidos. Na presença de solicitações de duração lenta, como as resultantes da retração térmica provocada pelas variações de temperatura diárias, o movimento das trincas associado também é lento (Colombier, 1997). Neste caso, a resposta nem sempre é linear relativamente à solicitação, uma vez que perante este tipo de solicitações as misturas asfálticas tendem a exibir um comportamento viscoelástico, com provável ocorrência de fluência ou relaxação. Quanto mais lenta for a solicitação, maior será a influência da componente viscosa.

No caso da ação do tráfego, a amplitude dos movimentos das trincas depende da amplitude das deformações da estrutura do pavimento resultantes da passagem do tráfego, que por sua vez depende da intensidade das cargas dos eixos dos veículos. Assim, a deformação estrutural na vizinhança da trinca é muito dependente da capacidade resistente do pavimento e da capacidade, total ou parcial, de transferência de carga entre as faces da trinca.

As alternativas para reduzir a propagação das trincas até a camada de desgaste do reforço do pavimento podem ser: (i) aumento da espessura da camada asfáltica de reforço; (ii) utilização de misturas asfálticas de reforço com maior resistência à propagação de trincas; (iii) interposição de uma camada de interface entre o pavimento trincado e as camadas de reforço, (iv) descolagem entre o pavimento existente e as camadas de reforço (Pais *et al.*, 2002).

3. CONSIDERAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS

Para a consideração da propagação de trincas na reabilitação de um pavimento, a cada uma das fases de iniciação e desenvolvimento de uma trinca no interior da sua estrutura podem ser aplicadas leis de comportamento, conforme o tipo de estrutura e as condições de carregamento aplicadas. Para a descrição da propagação das trincas em reforços de pavimentos constituídos por materiais asfálticos, a lei de fadiga e a lei de propagação de trincas são as que melhor se adequam (Francken *et al.*, 1997).

Para a avaliacao da fase de iniciacao de uma trinca no reforço, o tempo de vida previsto do reforço é estimado através do cálculo da deformacao de tração na base da camada de reforço, e utilizando-se a lei de fadiga da mistura asfáltica. A lei que permite realizar uma estimativa do número de eixos, “N”, necessários para iniciar uma trinca, como resultado da aplicacao repetitiva das cargas do tráfego, pode ser dada através da Equação 1 (Francken *et al.*, 1997):

$$N = \left(\frac{C}{\varepsilon} \right)^m \quad (1)$$

onde: C, m = parâmetros determinados experimentalmente através de ensaios de flexão repetitivos; ε = nível de extensão aplicado

Para a fase de propagacao é realizada uma abordagem teórica, tradicional, que se baseia na utilizacao de conceitos da mecânica da fratura. É geralmente aceito que a progressão de uma trinca pode ser representada através do uso da expressao de Paris & Erdogan (1963):

$$\frac{dC}{dN} = A \times K^n \quad (2)$$

onde: c = comprimento da trinca; dC/dN = crescimento do comprimento da trinca (c) por ciclo de carga (N); k = fator de intensidade de tensão, que representa as condições de tensão na frente da trinca; A, n = constantes de regressão.

Para se limitar a propagacao de uma trinca, os valores de “K”, “A” e “n” devem apresentar valores que sejam o mais baixo possível. O fator de intensidade de tensão, “K”, que comanda a progressão da trinca, não depende apenas da intensidade da sollicitacao, mas também do comprimento da trinca, da transferencia de carga entre faces da trinca e das características de rigidez do pavimento existente e da camada de reforço. Normalmente, para se avaliar o valor de “K” recorre-se à utilizacao da técnica dos elementos finitos. O valor de “K” associado à açao do tráfego pode ser expresso pela Equação 3 (generalizada):

$$K_{TR} = k_{tr} \times f(q, l, d, E_s, E_i, E) \quad (3)$$

onde:

k_{tr} = fator de intensidade de tensão, adimensional, dependente da razão c/h, da capacidade de transferencia de carga na trinca e do tipo de esforços que são gerados: flexão ou cisalhamento; c = comprimento da trinca no reforço; q = valor da carga representativa da açao do tráfego; l = definicao geométrica da carga; h = espessura do reforço; E_s = módulo de rigidez do subleito; E_i = módulo de rigidez das camadas do pavimento existente; E = módulo de rigidez da camada de reforço do pavimento.

Para o estudo da fase de iniciacao da trinca em um reforço, o tempo de vida, deste reforço, é estimado calculando-se a deformacao de tração na base da camada de reforço e, posteriormente, fazendo se uso de uma lei de fadiga. Para o estudo da fase de propagacao da trinca através do reforço, a análise por elementos finitos é realizada utilizando se os princípios da mecânica da fratura.

O modelo empírico-mecanicista de concepcao de reforços de pavimentos proposto por Sousa *et al.* (2002), considerando a propagacao de trincas, foi calibrado com medições efectuadas *in situ*, em

pavimentos trincados, através de medidores de atividade de trincas e de deflectômetro de impacto, observações ocorridas em Portugal e nos Estados Unidos (Estados do Arizona e da Califórnia).

A influência das propriedades do pavimento no estado de tensão e de extensão no reforço foi estabelecida através da definição de uma extensão de Von Mises, e designada por “Extensão de Von Mises”, de acordo com a Equação 4:

$$\varepsilon_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 \right)} \quad (4)$$

onde:

ε_{VM} = extensão de Von Mises; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ = deformações principais.

Através da aplicação de um modelo com base na metodologia dos elementos finitos foi desenvolvido um modelo estatístico para a determinação da extensão de Von Mises média nos elementos do reforço localizados acima da trinca, como mostram as Equações 5 e 6:

$$\varepsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) = a * [\text{espessura reforço (m)}]^b \quad (5)$$

$$a = \prod_{i=1}^6 [a_{1i} * \ln(X_i) + a_{2i}] ; b = \prod_{i=1}^6 [b_{1i} * \ln(X_i) + b_{2i}] \quad (6)$$

onde a variável X_i representa as propriedades das camadas do pavimento e, a_{ij} e b_{ij} representam coeficientes estatísticos.

Em termos de caracterização das propriedades das misturas asfálticas, foram realizados ensaios de fadiga à flexão alternada a 4 pontos, em deformação controlada. Para condições de ensaio à fadiga à flexão em quatro pontos, esta deformação pode ser relacionada com a extensão de Von Mises, ε_{VM} . O método proposto por Sousa *et al.* (2002) pode ser aplicado a qualquer tipo de mistura desde que sejam previamente determinadas, em ensaios de fadiga, as propriedades do material e as correspondentes curvas de fadiga.

4. PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

Como dito, para avaliar o dano na camada de reforço de um pavimento devido ao efeito do tráfego e das variações de temperatura foi realizada uma simulação numérica utilizando os modelos de propagação de trincas desenvolvidos por Minhoto (2007), incorporado ao programa de elementos finitos ANSYS 10.0 (Multiphysics). Os modelos determinam o nível de extensão de Von Mises a que o reforço do pavimento está submetido e, utilizando-se a lei de fadiga da mistura obtida nesta pesquisa, é avaliada a vida útil do reforço do pavimento e o dano relativo a um determinado tráfego atuante no período de análise adotado no estudo.

A simulação numérica desenvolvida por Minhoto (2007) baseia-se no princípio de funcionamento do pavimento, esquematizado na Figura 3, no qual se admite o seguinte:

- considerando um determinado intervalo de tempo, a ocorrência de variações de temperatura ao longo do mesmo induz no reforço de pavimento (na zona acima da trinca) um contínuo e variável estado de tensão de longa duração, ao qual se vão sobrepondo, ciclicamente, repetidos estados de tensão, de curta duração, representativos da passagem do rodado duplo de um determinado eixo;

- em cada instante de passagem de um eixo, o estado de tensão existente, de origem térmica, é incrementado, por adição, de um estado de tensão provocado pela passagem do eixo;
- admite-se que esta adição de tensões se baseia numa sobreposição dos efeitos dos mecanismos envolvidos na aplicação destas duas ações.

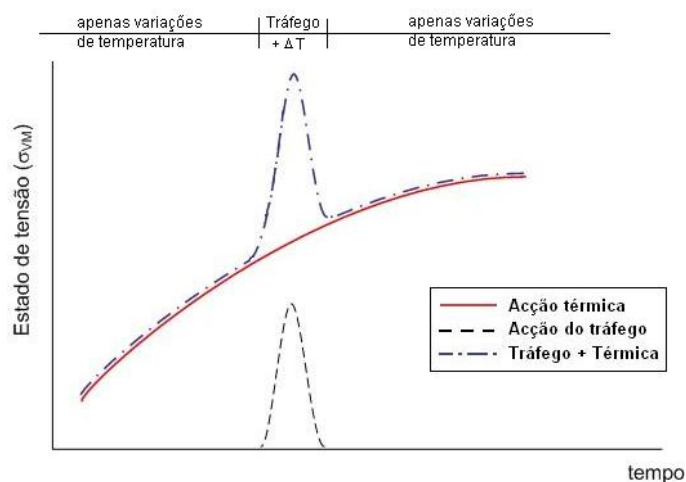


Figura 3. Consideração da evolução do estado de tensão no reforço submetido às ações de temperatura e de tráfego (Minhoto, 2007)

O modelo para estudo do efeito da ação do tráfego, desenvolvido em regime elástico linear, considera a aplicação de uma carga vertical simulando o eixo de um veículo. O modelo para consideração das variações de temperatura foi desenvolvido em regime viscoelástico e considerando-se as temperaturas verificadas na região de Florianópolis (dados da temperatura do ar em 30 anos).

A Figura 4 apresenta o modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica, o qual é composto por uma camada representando o subleito, duas camadas (asfáltica e granular) representando o pavimento antigo e uma camada de reforço. Na camada asfáltica existente foi simulada uma trinca para representar o trincamento do pavimento existente. O modelo foi criado utilizando elementos do tipo sólido de 8 nós e três graus de liberdade por nó (*SOLID 185* do software ANSYS 10.0).

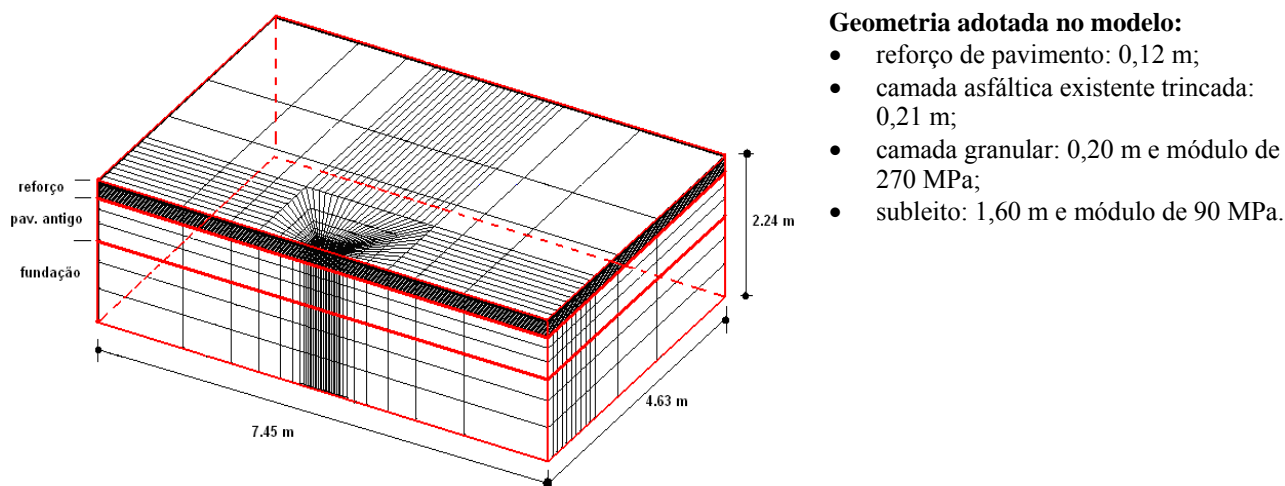


Figura 4 – Modelo do pavimento para estudo da propagação de trincas (Minhoto, 2007)

A camada asfáltica trincada foi caracterizada através do seu módulo e coeficiente de Poisson para uma frequência de 10 Hz, como mostrados no Quadro 1.

Quadro 1. Propriedades da mistura asfáltica da camada trincada (Minhoto, 2007)

Temperatura (°C)	Módulo (MPa)	Coefficiente de 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

A simulação numérica da propagação de trincas foi realizada em misturas asfálticas com asfalto-borracha e comparada com uma mistura com asfalto convencional, de referência. O asfalto-borracha utilizado foi produzido em planta industrial (sistema *terminal blend*). O asfalto convencional empregado foi o CAP 50/70 (DNIT – EM 095, 2006), que também foi o asfalto base para produção dos asfaltos-borracha.

A granulometria densa contínua utilizada para produzir a mistura com asfalto-borracha foi a preconizada pelo *Asphalt Institute* (AI – tipo IV) e para a granulometria descontínua, adotou-se a normatizada pelo *Caltrans (California Department of Transportation)*, (ARHM GG – *Asphalt Rubber Hot Mix – Gap Graded*). A granulometria da mistura de referência foi a especificada pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), DNIT – ES 031, 2006 – Concreto Asfáltico Usinado à Quente, faixa “C”. O Quadro 2 apresenta as características das misturas asfálticas utilizadas na simulação.

Quadro 2. Características das misturas asfálticas

Mistura	Granulometria	Asfalto	Tipo de asfalto	% de borracha	Teor de asfalto	Volume de vazios
AB1	Densa contínua	Com borracha	<i>Terminal blend</i>	15%	7,0%	5%
AB2	Descontínua	Com borracha	<i>Terminal blend</i>	20%	8,5%	6%
CON	Densa contínua	Convencional	CAP 50/70	-	5,5%	4%

O comportamento mecânico das misturas asfálticas (convencional e com asfalto-borracha) necessário para aplicação dos modelos (módulo dinâmico em flexão e a resistência à fadiga) foram obtidos em ensaios de laboratório.

O módulo dinâmico em flexão foi determinado de acordo com a norma ASTM 3497 (1995), aplicando-se um carregamento sinusoidal alternado, correspondente a uma deformação máxima de tração na base do corpo de prova de 50×10^{-6} . Os ensaios foram conduzidos nas temperaturas de 15 °C, 20 °C e 25 °C em sete frequências (10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz). A partir dos resultados obtidos em laboratório, foi desenvolvida uma lei de variação do módulo com a temperatura. Para temperaturas superiores a 25 °C, considerou-se que a variação do módulo segue a Equação 7 e para temperaturas inferiores a 25 °C, a Equação 8. A Figura 5 apresenta os valores obtidos para temperaturas de -5 °C até 50 °C.

$$\log E = a + T \times b \quad (7)$$

$$E = a + T \times b \quad (8)$$

onde: E = módulo dinâmico (MPa); T = temperatura (°C); a, b = constantes experimentais.

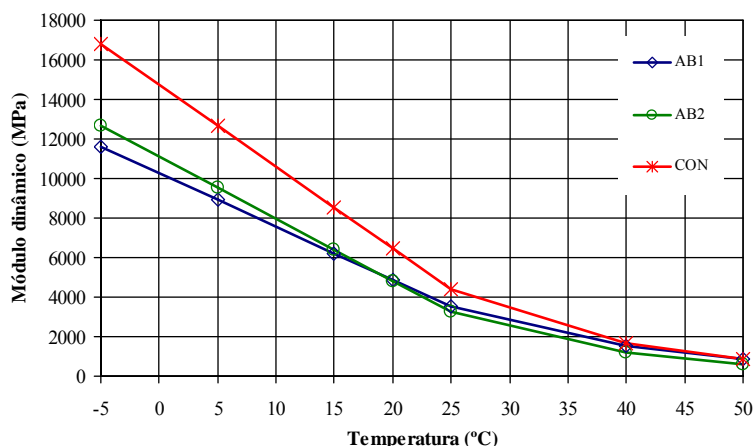


Figura 5. Variação do módulo dinâmico com a temperatura

Os ensaios de fadiga foram realizados por flexão alternada em 4 pontos, em extensão controlada, de acordo com a norma AASHTO TP8 (1994). Para determinação das leis de fadiga, foram realizadas 3 repetições para cada nível de deformação selecionado (200, 400 e 800 $\mu\text{m/m}$), à temperatura de 20 °C e frequência de 10 Hz. A aplicação do modelo de elementos finitos utilizado neste trabalho requer, para determinação da vida útil do reforço do pavimento, a lei da resistência à fadiga do material da camada de reforço, em função da temperatura. Deste modo, para a modelação numérica, as leis de fadiga das misturas foram expressas em função da extensão e do módulo dinâmico, de acordo com a Equação 9, captando esta última variável, o efeito da temperatura. Os parâmetros experimentais obtidos são indicados no Quadro 3.

$$N = a \times E^b \times \varepsilon^c \quad (9)$$

onde: N = resistência à fadiga; E = módulo dinâmico; ε = extensão de tração; a, b, c = constantes experimentais.

Quadro 3. Parâmetros das leis de fadiga de acordo com a Equação 9

Constantes	Misturas		
	AB1	AB2	CON
a	$-1,185 \times 10^{-4}$	-0,2367	$-3,360 \times 10^{-4}$
b	-0,9368	-1,4172	-0,6320
c	-5,5705	-5,9711	-4,1910

O dano associado à ocorrência de propagação de trincas, obtido de acordo com a Equação 10, considerou um tráfego anual ($1,22 \times 10^7$) correspondente ao utilizado por Minhoto (2007).

$$\text{Dano} = \frac{N}{\text{Tráfego}} \quad (10)$$

onde: N = vida previsível do reforço; Tráfego = obtido através do estudo de tráfego (equivalente ao eixo padrão de 80 kN).

A avaliação da propagação de trincas no reforço, é realizada para um período de tempo de 24 horas, a partir da hora em que se verifica a maior temperatura no pavimento, simulando a partir daí a relaxação e retração do pavimento devido à variação diária de temperatura. As medições da temperatura no pavimento realizadas por Minhoto (2007) mostraram que a temperatura apresenta uma variação diária aproximadamente sinusoidal, pelo que a simulação numérica da propagação de trincas pode ser realizada aplicando um perfil de temperaturas sinusoidal ao longo do dia.

Com a definição deste perfil de temperaturas é possível se obter a resposta do reforço do pavimento, em termos de extensões de Von Mises, ao longo das 24 horas simuladas. A repetição do processo para todos os dias do mês permite obter a resposta ao longo do mês. A análise fica completa pela simulação deste processo para os 12 meses do ano, o que permite determinar o dano anual do reforço do pavimento.

Também foi demonstrado por Minhoto (2007) que a temperatura do ar ao longo de um mês sofre variações muito pequenas ao longo dos anos, o que permite que a análise do comportamento do reforço do pavimento possa ser realizada apenas para um perfil de temperaturas representativo do mês, devendo adotar-se para temperatura máxima, a média das temperaturas máximas diárias que se verificam ao longo do mês, e para a temperatura mínima, a média das temperaturas mínimas diárias que se verificam ao longo do mês. Este processo pode ser realizado para as temperaturas ao longo de um ano, através da consideração das temperaturas máxima e mínimas para cada mês, o que permite realizar o estudo para os 12 meses do ano. O processo mais expedito de aplicação dos modelos de propagação de trincas consiste na determinação de leis de variação do dano com a temperatura e mínima, ou com a temperatura máxima e a variação de temperatura, de acordo com a Equação 11:

$$\text{dano} = a \times T_{\max}^b \times e^{c \times \Delta T} \quad (11)$$

onde:

T_{\max} = temperatura máxima diária do ar (°C); ΔT = amplitude diária de temperatura do ar (°C);
e = número neperiano; a, b, c = constantes experimentais de ajuste à evolução mensal do dano.

Assim, a análise numérica da propagação de trincas foi realizada para cinco perfis de temperatura do ar, a partir dos quais se obteve o dano mensal do reforço do pavimento, para as misturas consideradas através das leis de fadiga indicadas no Quadro 3. Os resultados da análise numérica da propagação de trincas para as cinco condições de temperatura e para as misturas em estudo permitiu obter os danos mensais indicados no Quadro 4.

Quadro 4. Danos mensais para as misturas em estudo

T_{\max} (°C)	ΔT (°C)	AB1	AB2	CON
25	25	$8,791 \times 10^{-5}$	$9,141 \times 10^{-5}$	$3,912 \times 10^{-3}$
35	10	$1,794 \times 10^{-2}$	$5,326 \times 10^{-2}$	$1,150 \times 10^{-1}$
15	15	$1,675 \times 10^{-5}$	$1,009 \times 10^{-5}$	$1,249 \times 10^{-3}$
10	10	$9,573 \times 10^{-6}$	$5,625 \times 10^{-6}$	$6,592 \times 10^{-4}$
25	15	$1,443 \times 10^{-4}$	$1,303 \times 10^{-4}$	$5,108 \times 10^{-3}$

A aplicação do modelo expresso na Equação 11 aos resultados do dano mensal obtido para as cinco condições de temperatura e para as misturas em estudo, conduziu aos parâmetros indicados no Quadro 5, os quais permitem, a partir de agora, obter o dano mensal para qualquer mês do ano conhecendo-se a temperatura máxima e a amplitude térmica.

Quadro 5. Parâmetros do modelo do dano mensal (Equação 11)

Parâmetro	AB1	AB2	CON
a	$3,44 \times 10^{-9}$	$3,85 \times 10^{-9}$	$2,17 \times 10^{-7}$
b	4,60	4,70	3,97
c	-0,223	-0,243	-0,130

A previsão do dano médio mensal de cada mistura, adaptado às condições climáticas de Florianópolis (Sul do Brasil), referidas em termos de temperatura máxima do ar e amplitude diária, é apresentada no Quadro 6.

Quadro 6. Dano mensal do reforço do pavimento

Mês	T _{máx} (°C)	ΔT (°C)	AB1	AB2	CON
Julho	10,14	8,06	2,39x10 ⁻⁵	2,90x10 ⁻⁵	7,49x10 ⁻⁴
Agosto	11,02	10,67	1,96x10 ⁻⁵	2,28x10 ⁻⁵	7,43x10 ⁻⁴
Setembro	11,69	9,95	3,02x10 ⁻⁵	3,58x10 ⁻⁵	1,03x10 ⁻³
Outubro	15,69	13,13	5,74x10 ⁻⁵	6,59x10 ⁻⁵	2,19x10 ⁻³
Novembro	19,68	12,29	1,96x10 ⁻⁴	2,35x10 ⁻⁴	6,01x10 ⁻³
Dezembro	28,13	15,22	5,27x10 ⁻⁴	6,17x10 ⁻⁴	1,70x10 ⁻²
Janeiro	27,68	15,17	4,95x10 ⁻⁴	5,79x10 ⁻⁴	1,60x10 ⁻²
Fevereiro	25,78	11,49	8,11x10 ⁻⁴	1,01x10 ⁻³	1,95x10 ⁻²
Março	25,16	16,46	2,34x10 ⁻⁴	2,70x10 ⁻⁴	9,27x10 ⁻³
Abril	16,75	9,12	1,90x10 ⁻⁴	2,38x10 ⁻⁴	4,79x10 ⁻³
Mai	10,09	9,13	1,84x10 ⁻⁵	2,19x10 ⁻⁵	6,39x10 ⁻⁴
Junho	9,08	9,45	1,06x10 ⁻⁵	1,23x10 ⁻⁵	4,03x10 ⁻⁴
Dano anual (Σ)			2,62x10 ⁻³	3,14x10 ⁻³	7,83x10 ⁻²

O somatório do dano mensal (aplicação da hipótese de Miner do dano acumulado), ao longo dos meses do ano, permite obter o dano anual, como apresenta a Figura 5 (a), na qual se observa que o dano mais elevado foi observado na mistura convencional (CON). A vida do reforço, em anos, calculada como o inverso do dano anual, é ilustrada graficamente através da Figura 6 (b), onde se observa a menor vida prevista para o reforço com a mistura convencional.

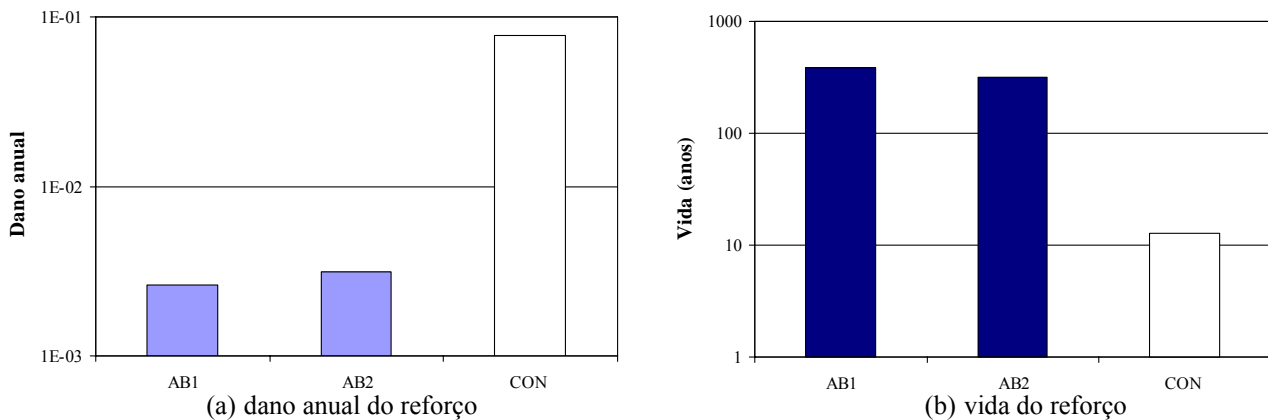


Figura 6. Dano anual e vida do reforço à propagação de trincas prevista

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a aplicação da mistura convencional no reforço do pavimento em estudo, conduziu, teoricamente, a uma vida de 13 anos, enquanto que as misturas com asfalto-borracha teriam até 381 anos de vida. Isto representa, em termos relativos, uma vida de 1 para 29,9 vezes. A elevada diferença de vida entre as misturas, pode ser compreendida devido ao fato da comparação estar sendo realizada perante uma mistura com um desempenho fraco (CON) e outras com um desempenho mecânico muito superior (AB1 e AB2) nos ensaios de flexão alternada em 4 pontos. A resistência à fadiga obtida nos ensaios de flexão, para a deformação de 100×10^{-6} , verificou-se que a resistência à fadiga das misturas com asfalto-borracha chegou a ser 300 vezes superior à resistência à fadiga da mistura convencional de referência. Este fato evidencia que os resultados da modelação da propagação de trincas parecem não serem muito elevados, comparativamente aos obtidos para a fadiga por flexão, além de mostrarem que a propagação de trincas é um fenômeno mais crítico que a fadiga por flexão.

5. CONCLUSÕES

A resistência à propagação de trincas foi avaliada recorrendo-se a uma simulação numérica em que foram consideradas duas misturas com asfalto-borracha do tipo *terminal blend* e a uma mistura convencional de referência, avaliando-se o dano causado pelo tráfego e pelo clima em um pavimento a ser reabilitado. A simulação numérica foi realizada utilizando os modelos de propagação de trincas desenvolvidos por Minhoto (2007), para avaliar o dano na camada de reforço de um pavimento devido ao efeito do tráfego e das variações de temperatura. Na simulação numérica da propagação de trincas considerou-se as variações de temperatura representativas da região de Florianópolis, Santa Catarina, que permitiu concluir que com misturas com asfalto-borracha pode obter-se uma vida do reforço do pavimento até 29,9 vezes superior se comparada a uma mistura convencional. As misturas com asfalto-borracha utilizadas apresentaram um desempenho de fadiga à flexão muito superior à mistura convencional.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Programa ALβAN (Programa de Bolsas de Alto Nível da União Europeia para a América Latina), pela bolsa nº E04D040507BR e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Agradece-se à empresa Greca Asfaltos do Brasil pelo envio dos asfaltos e à Pedreira Bezerras de Portugal pelo fornecimento dos agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Colombier, G. (1997). Cracking in Pavements: Nature and Origin of Cracks. RILEM Report 18, Prevention of Reflective Cracking in Pavements. E & SPON. London, U.K.

Francken, L. (1997). RILEM Interlaboratory Test on Binder Rheology. Proceedings of the Fifth International Rilem Symposium MTBM – Mechanical Tests for Bituminous Materials. Lyon, France.

Irwin, G.R. (1957). Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. Journal of Applied Mechanics 24, pp. 361–363.

Minhoto, M.J.C. (2007). Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

Pais, J.C.; Pereira, P.A.A.; Sousa, J.M.B.; Capitão, S. (2002). Evaluation of the Load Associated Cracking in Flexible Pavements. Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields – Volume 1. Lisbon, Portugal.

Paris P.C. & Erdogan F. (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Transactions. of the ASME. Journal of Basics Engineering, Series D, 85, nº3, p. 528.

Sousa, J.B.; Pais, J.C.; Saim, R.; Way, G.; Stubstad, R.N. (2002). Development of a Mechanistic Empirical Based Overlay Design Method for reflective Cracking. Journal of the Transportation Research Board. Washington, D.C., USA.

Trevino, M.; Dossey, T.; McCullough, F.B.; Yildirim Y., (2003). Applicability of Asphalt Concrete Overlays on Continuously Reinforced Concrete Pavements. FHWA/TX-05/0-4398 1. Texas Department of Transportation. Austin, Texas, USA.

Vanelstraete, A. & de Bondt, A.H. (1997). Cracking Prevention and Use of Overlay Systems. RILEM Report 18, Prevention of Reflective Cracking in Pavements. E & SPON. London, U.K.