

Universidade do Minho

[CN-24]

Minhoto, M.J.C., **Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A., Picado-Santos, L.G.

“Influência das variações de temperatura na previsão da vida à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos”

3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 24 – 26 de Novembro de 2004

# INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NA PREVISÃO DA VIDA À REFLEXÃO DE FENDAS DOS REFORÇOS DE PAVIMENTOS

MANUEL J. C. MINHOTO

*PROF. ADJUNTO, INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA*

JORGE C. PAIS

*PROF. AUXILIAR, UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES*

PAULO A. A. PEREIRA

*PROF. CATEDRÁTICO, UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES*

LUÍS PICADO-SANTOS

*PROF. AUXILIAR COM AGREGAÇÃO, UNIVERSIDADE DE COIMBRA, COIMBRA*

## RESUMO

Realizou-se um estudo sobre a influência das variações de temperatura na vida dos reforços de pavimentos. As variações de temperatura, conjugadas com o fenómeno de reflexão de fendas, considerada como principal degradação, agravam significativamente o estado de tensão no pavimento, reduzindo o tempo de serviço previsto para os reforços de pavimentos. Neste trabalho apresenta-se o resultado duma análise, baseada no uso do método dos elementos finitos, da estimativa da vida útil de uma camada de reforço aplicada sobre um pavimento fendilhado, conjugando as acções das variações de temperatura e do tráfego. Os resultados obtidos permitem avaliar a influência das variações de temperatura na estimativa da vida útil de uma camada de reforço. Apresenta-se ainda uma comparação entre a estimativa de vida de um reforço considerando apenas a acção do tráfego e a estimativa de vida útil resultante da conjugação do tráfego com as variações térmicas.

## 1. INTRODUÇÃO

O reforço de pavimento tem constituído a base de muitas estratégias de conservação adoptadas na reabilitação estrutural dos pavimentos rodoviários flexíveis. Durante os primeiros anos de vida de uma camada de reforço, colocada sobre um pavimento antigo fendilhado e sujeita à acção de carregamento estático e repetitivo, tem-se verificado o desenvolvimento prematuro de novo fendilhamento directamente acima das fendas existentes, com início na sua fronteira inferior e com propagação para a superfície. Este fenómeno é tradicionalmente designado por “reflexão de fendas” e constitui uma das grandes preocupações das instituições rodoviárias. Diversos autores, [1], [2] apontam diferentes

causas responsáveis pela origem e propagação do fendilhamento nos reforços dos pavimentos [1], actuando separada ou conjuntamente:

1. Concentração de tensões na camada de reforço resultantes de fadiga térmica, ou seja, que ocorrem devido a movimentações cíclicas das fendas resultantes das variações de temperatura;
2. Ocorrência de tensões de tracção críticas na camada de reforço resultantes do arrefecimento rápido e acentuado da zona superior desta camada;
3. Carregamento cíclico do tráfego acelera a degradação na camada de reforço e aumenta a taxa de propagação das fendas, independentemente da sua origem;
4. Assentamentos do solo de fundação.

Crê-se que os pavimentos reforçados submetidos a condições de variações de temperatura, a alguns decímetros de profundidade, reduzem significativamente a sua capacidade de resistência ao fenómeno da reflexão de fendas. Por um lado, as propriedades das misturas betuminosas (tal como a rigidez) apresentam elevada sensibilidade às variações de temperatura. Por outro lado, a acumulação de tensões de tracção na camada de reforço, de origem na retracção térmica, conjugadas com o efeito das cargas do tráfego conduzem à ocorrência e/ou aceleração do fenómeno de reflexão de fendas. Esta combinação de acções é considerada como a principal responsável pela ocorrência da reflexão de fendas [3]. A adopção de soluções que visem evitar a ocorrência, ou o atraso, deste tipo de fendilhamento tem sido objecto de muita atenção, destacando-se as seguintes medidas:

- adopção de camadas de reforço com maiores espessuras;
- optimização da rigidez e da resistência à fractura dos materiais que integram as camadas de reforço, adicionando fibras ou aplicando betumes modificados;
- colocação de sistemas de absorção/dissipação de tensões e de reforço entre a camada de reforço e o pavimento existente.

O uso de misturas que integrem o betume modificado com borracha proveniente da reciclagem de pneus usados, pelo processo húmido, tem demonstrado ser uma boa alternativa para o retardamento da reflexão de fendas, exibindo bom desempenho perante condições de variações de temperatura, pelo facto de apresentarem propriedades elásticas melhoradas, relativamente às misturas convencionais [4]. Este tipo de misturas exibem capacidade de dissipar tensões de tracção causadas por reflexão de fendas num quadro de variações térmicas, para além da redução da susceptibilidade térmica do ligante e de se permitirem ganhos de flexibilidade a baixas temperaturas sem perda de resistência às deformações permanentes a altas temperaturas [5]. O trabalho apresentado envolve a determinação dos estados de tensão e de extensão num pavimento reforçado, associados à aplicação de dois tipos de carregamento: aplicação de um eixo de rodado duplo de 130 kN e um arrefecimento rápido da estrutura do pavimento. A aplicação simultânea destas duas acções conduz à elevada concentração de tensões, numa zona da camada de reforço localizada acima duma fenda da camada subjacente,

estabelecendo-se assim uma zona activa de provável rotura global ou de propagação da fenda. O estudo do efeito destas duas acções permite avaliar a influência do carregamento térmico na vida útil à reflexão de fendas de camadas de reforço.

## 2. PRINCÍPIOS TEÓRICOS

Em geral, a actividade vertical de fendas (abertura de fendas em modo II) tem sido apontada como a principal causa da reflexão de fendas em reforços de pavimento [2], [1], enquanto que a reflexão de fendas de origem térmica se deve a uma actividade horizontal de fendas, (abertura em modo I). A indução de um estado de tensão na camada de reforço devido a condições de arrefecimento climático, cuja gravidade depende da difusividade térmica dos materiais, segue dois mecanismos distintos. Por um lado, é induzido um estado de tensão/extensão (tensões de tracção horizontais) resultante da retracção térmica restringida da camada de reforço. Por outro lado, a actividade horizontal das fendas ocorrida na camada subjacente, resultante da retracção térmica desta, exerce uma acção cíclica de corte ao nível da base da camada de reforço, induzindo um importante incremento do estado de tensão/extensão nesta camada. Daqui resultam estados de tensão/extensão consideráveis, cujo nível depende de: rigidez das misturas, coeficientes de retracção térmica, coeficiente de Poisson, espessuras das camadas, grau de atrito entre camadas, distância entre fendas e do gradiente térmico em todo o pavimento.

Em [1] é proposta uma metodologia empírico-mecanística de concepção de reforços de pavimento, considerando a reflexão de fendas em modos I e II e considerando como principal acção o tráfego. Os materiais considerados são as misturas convencionais densas e as misturas com betume de borracha de granulometria descontínua. A influência das características do pavimento no estado de tensão/extensão do reforço é considerada através da obtenção de uma extensão deviatória designada por “extensão de Von Mises”, e calculada através da seguinte expressão:

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

Nesta expressão  $\varepsilon_{VM}$  representa a extensão de “Von Mises”. A aplicação da metodologia envolve o uso de resultados de ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, sob extensão controlada, cuja relação com a extensão de “Von Mises”,  $\varepsilon_{VM}$ , pode ser expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon_{VM} = \varepsilon_1 (1 + \nu) \quad (2)$$

onde  $\varepsilon_1$  representa a extensão de fadiga. Neste contexto, a extensão deviatória de “Von Mises” é definida como um parâmetro de controlo da reflexão de fendas, sendo usada para

estimar a vida útil expectável de um reforço. No presente estudo calculou-se, em primeiro lugar, as tensões/extensões na zona da camada de reforço acima da fenda para cada tipo de carregamento (tráfego e variações de temperatura), usando o Método dos Elementos Finitos. Usando a Equação (1) são calculadas as extensões de Von Mises,  $\epsilon_{VM}$ , associadas a cada tipo de carregamento e à sua combinação. As extensões de “Von Mises” são, em seguida, usadas para estimar a vida útil da camada de reforço, através da Equação (2) e das leis de fadiga determinadas para os materiais em estudo.

### 3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO PAVIMENTO

A abordagem adoptada para a modelação tridimensional do problema foi baseada na metodologia dos elementos finitos, por se considerar ser a metodologia mais sensível na avaliação de tensões/extensões associadas a condições de carregamento pouco convencionais - caso das estruturas com fendas, sujeitas ao carregamento térmico e de tráfego. A concepção do modelo numérico, que se representa na Figura 1, seguiu uma abordagem tradicional: considerar a estrutura do pavimento como um conjunto de camadas horizontais homogéneas contínuas, com espessura constante, infinitas na direcção horizontal e apoiadas num solo de fundação considerado semi-infinito na direcção vertical. A camada superior representa a camada de reforço e na sua camada subjacente é definida uma fenda longitudinal, cuja largura se considera constante em toda a espessura, permitindo-se apenas a ocorrência das variações da largura da fenda resultantes da retracção térmica na camada fendilhada.

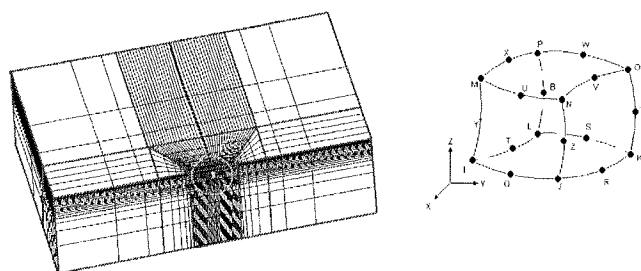


Figura 1. Modelo 3D de Elementos Finitos baseado no elemento de 20 nós

A análise por elementos finitos foi realizada com o código fonte constante no programa comercial ANSYS 8.1, adoptando-se uma modelação tridimensional do problema. Na definição do modelo adoptou-se um elemento do tipo sólido tridimensional (SOLID186) (Figura 1) que assume uma interpolação quadrática do campo de deslocamentos (20 nós) e apresenta três graus de liberdade por nó. A discretização do modelo, que conduziu à consideração de 16330 elementos, obedeceu a um critério de malhagem mais densa junto à superfície do pavimento, na zona do reforço e no ponto de aplicação da carga, pois tratam-se de zonas com grandes gradientes de tensões.

A acção do tráfego é considerada através duma carga distribuída, representando um rodado duplo de um eixo de 130 kN, aplicada numa zona adjacente à fenda (Figura 2). O carregamento térmico consistiu numa análise do tipo estática (não-transiente), considerando uma temperatura inicial uniforme nas camadas betuminosas,  $T_i$ , a partir da qual se aplicou uma variação instantânea de temperatura,  $\Delta T_i$ . O conjunto de valores adoptados para a temperatura inicial,  $T_i$ , foi de: 20 °C, 10 °C e 0 °C. O conjunto de valores adoptados como variações de temperatura,  $\Delta T_i$ , foi de: -5 °C, -15 °C e -30 °C. Cada caso de carregamento térmico resulta da combinação entre cada um dos valores atribuídos a  $T_i$  e  $\Delta T_i$ . Como condição fronteira foram considerados apoios simples, com orientação perpendicular às superfícies envolventes do modelo, em todas as superfícies envolventes, excepto na face representativa da superfície do pavimento. O modelo adoptado, que por questões de simetria geométrica e mecânica representa metade do modelo real, apresenta convergência de resultados com outros modelos calibrados de modelação de actividade de fendas vertical e horizontal [1], de avaliação de extensões de fadiga e de deformações permanentes, como por exemplo o ELSYM5.

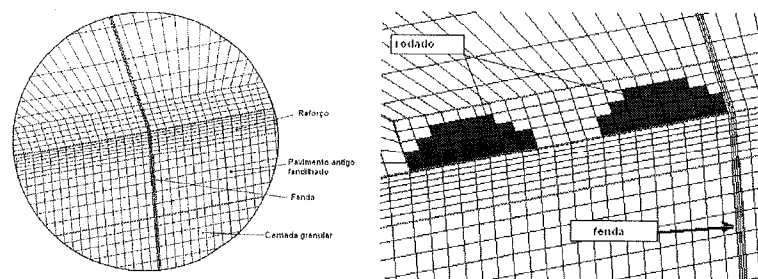


Figura 2. Representação da fenda e da configuração do rodado duplo

Na caracterização dos materiais constituintes das camadas, considerados isotrópicos e homogêneos, foi adoptado um comportamento elástico-linear, no qual se considera a rigidez das camadas betuminosas dependente da temperatura. Esta dependência é estimada com base nas relações propostas pela metodologia SHELL, usando como dados de entrada a rigidez do ligante e as características volumétricas representativas do tipo de misturas consideradas. A rigidez do ligante, determinada a partir do ábaco de Van Der Poel, é dependente da temperatura, do índice de penetração adoptado para os ligantes e do tempo de carregamento adoptado. A determinação da rigidez dos materiais betuminosos, para o caso de carregamento devido ao tráfego, baseou-se numa frequência de carregamento de 10 Hz. No caso do carregamento térmico, o tempo de carregamento adoptado reflecte a capacidade de relaxação do material constituinte das camadas betuminosas, conforme proposta de [5]. O coeficiente de retracção térmica,  $\alpha$ , foi considerado constante e independente da temperatura, adoptando-se para a mistura convencional densa o valor de  $1.4 \times 10^{-5}$  e para a mistura com betume modificado com borracha o valor de  $2.16 \times 10^{-5}$ . O coeficiente de Poisson,  $\nu$ , assumido para as camadas betuminosas e para o solo de fundação foi de 0.35, enquanto que para as camadas granulares foi de 0.30. No estudo foram definidos três tipos de estruturas de pavimento -

PAV01, PAV02, PAV03) - cuja caracterização se apresenta na Tabela 1. O efeito do envelhecimento das camadas betuminosas foi considerado através da afectação dos parâmetros mecânicos das misturas de factores adequados.

Tabela 1 – Caracterização das estruturas de pavimento em estudo

Tipo de estrutura	Espessuras (m)			Rigidez (MPa)	
	Camada de reforço	Camada fendilhada	Camada granular	Camada granular	Fundação
PAV01	0.02	0.10	0.30	250	100
PAV02	0.07	0.15	0.30	250	100
PAV03	0.10	0.25	0.30	250	100

#### 4. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

A análise do problema envolveu a obtenção de múltiplas soluções, cada uma obtida para cada caso de carregamento (apenas tráfego ou apenas variações de temperatura) e para cada tipo de estrutura, resultando o estudo de 144 situações de carregamento (térmico e de tráfego). Para análises numéricas associadas ao tráfego, as temperaturas nos nós, associadas a cada caso de carregamento térmico, são consideradas na definição da rigidez das camadas betuminosas. Cada análise mecânica envolve a determinação de componentes de tensão e de extensão nos nós localizados acima da fenda (Figura 3).

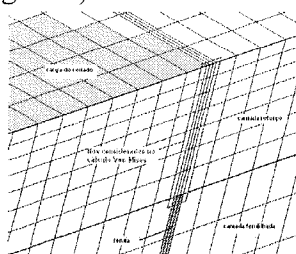


Figura 3. Nós usados na determinação das extensões de Von Mises

Em seguida, os resultados obtidos são combinados para obtenção dos estados de tensão/extensão associados ao carregamento conjunto das duas acções. As componentes de extensão assim obtidas são usadas para determinar as extensões de Von Mises em cada nó, a partir das quais se define a extensão média de Von Mises na zona crítica acima da fenda. Este valor da extensão média de Von Mises é usada para estimar a vida útil da camada de reforço para cada caso de carregamento, usando a Equação 2 conjugada com as leis de fadiga disponíveis. Nos casos omissos em [1], foram usadas as expressões propostas pela metodologia SHELL.

#### 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Para avaliar a influência relativa da acção do tráfego e da acção térmica no desempenho das camadas de reforço, analisa-se a vida útil do reforço para duas situações de carregamento: acção do tráfego (com e sem variação da rigidez com a temperatura) e actuação do tráfego

associado às variações de temperatura no reforço e na camada fendilhada. Nas Figuras 4 e 5 representa-se a estimativa de vida útil (nº de eixos) da camada de reforço, para os tipos de pavimento PAV01 e PAV03, para estas situações de carregamento. As linhas verticais representam a vida de projecto à reflexão de fendas, ou seja, o número de eixos considerando uma rigidez constante nas camadas betuminosas para uma temperatura de 20°C. Nestas figuras os valores de  $\Delta T_{ref}$  representam as variações de temperatura na camada de reforço e os valores de  $\Delta T_{fend}$  representam as variações de temperatura na camada fendilhada.

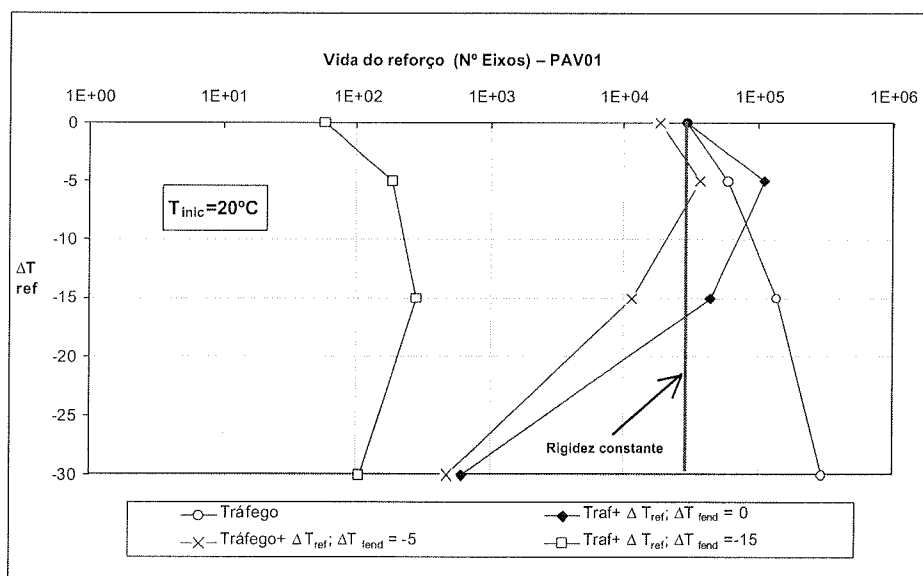


Figura 4. Vida útil do reforço da estrutura PAV01

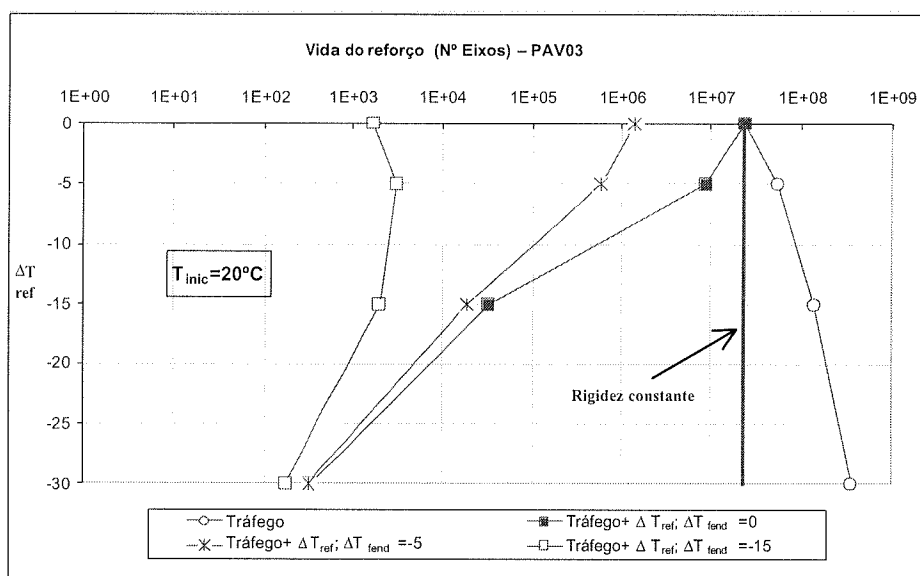


Figura 5. Vida útil do reforço da estrutura PAV03



Comparando as situações de carregamento do tráfego e de projecto, constata-se que a consideração da temperatura na rigidez das camadas betuminosas conduz, analiticamente, ao aumento da vida do reforço, uma vez que, perante uma diminuição de temperatura, a rigidez das camadas betuminosas aumenta, conduzindo à redução do nível de extensão no reforço.

### 5.1. Influência das variações de temperatura na vida do reforço

Considerando as Figuras 4 e 6, e analisando o conjunto dos tipos de pavimento, os resultados apontam para que o número de eixos admissível decresça quando a temperatura nas camadas betuminosas decresce. Pode-se ainda constatar pequenas diferenças de desempenho que se atribuem às diferentes capacidades de suporte. Nos pavimentos com maior espessura, a que corresponde maior capacidade de suporte, as variações de temperatura assumem uma influência significativa na vida útil dos reforços de pavimento. Em pavimentos de menor capacidade de carga, a acção do tráfego constitui o principal factor condicionante da estimativa da vida útil dos reforços. Quanto mais espessa for a estrutura do pavimento maior será o decréscimo de vida em função do decréscimo de temperatura.

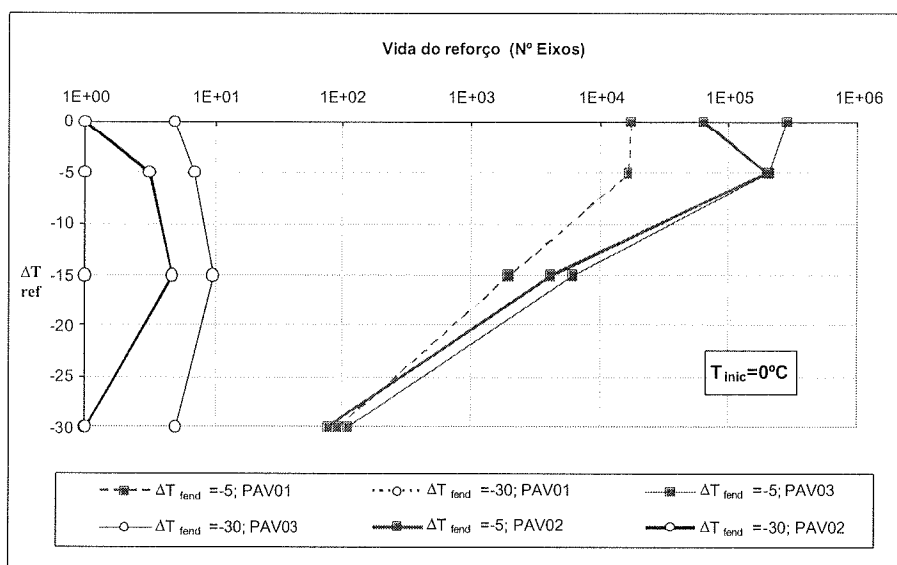


Figura 6. Vida do reforço para uma temperatura inicial de  $10^\circ C$  e para valores de  $\Delta T_{ref}$  de  $-5^\circ C$  e  $-30^\circ C$ .

### 5.2. Idêntica variação de temperatura nas camadas Betuminosas

A situação de aplicação da mesma variação de temperatura, quer na camada de reforço quer na camada fendilhada representa uma assunção normalmente adoptada no processo de concepção, quer de reforços de pavimento quer de pavimentos novos. Na Figura 7 é representada a vida à reflexão de fendas das estruturas estudadas, considerando uma temperatura inicial  $20^\circ C$  e aplicando variações de temperatura às camadas betuminosas de

5 °C, -15 °C e -30 °C. Os resultados obtidos são idênticos para os três tipos de estruturas, concluindo-se que a estimativa de vida à reflexão de fendas da camada de reforço decresce como o decréscimo da temperatura nas camadas betuminosas, verificando-se para as temperaturas mais baixas, valores muito baixos para o número de eixos admissíveis.

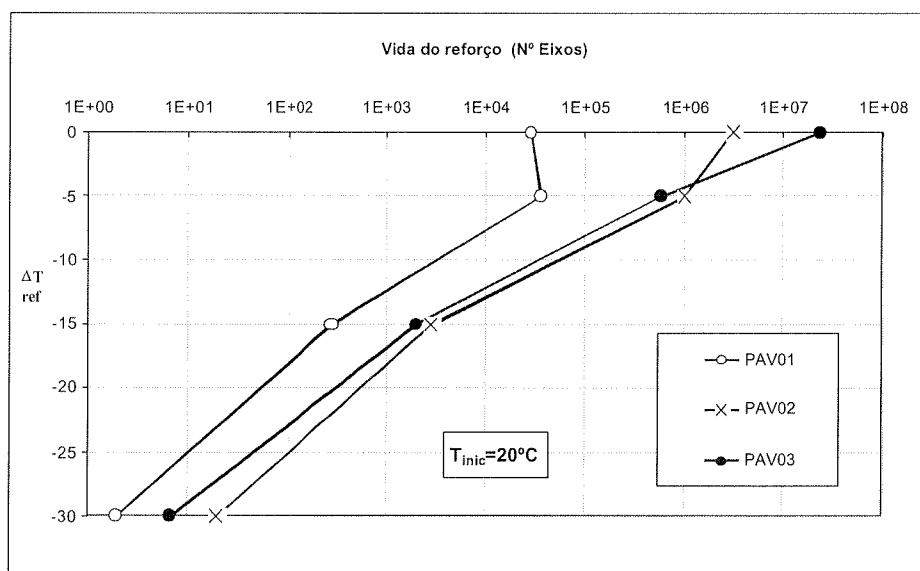


Figure 7. Vida útil em função de  $\Delta T_{ref}$  aplicado com igual valor em ambas camadas

### 5.3. Aplicação do estudo a misturas com betume modificado com borracha de pneus

O âmbito do presente estudo alargou-se à análise de misturas com betume modificado com borracha, usando-se os dados de caracterização deste tipo de misturas, propostos no estudo [1], resultantes da realização de ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos (AASHTO 8-94), sob extensão controlada, a misturas com betume modificado com borracha. Destes ensaios resultou a expressão de fadiga (3), expressa em função da extensão de Von Mises. Com base nesta expressão determinou-se a vida útil à reflexão de fendas para misturas com betumes de borracha e comparou-se com a vida útil de misturas convencionais, calculada pelas expressões da lei de fadiga usadas pela metodologia SHELL. Analisando a Figura 8 constata-se que as misturas com betume de borracha apresentam vida útil à reflexão de fendas melhorada, quando comparadas com uma mistura convencional, acentuando-se essa melhoria nas gamas mais altas de variações de temperatura.

$$NEEP_s = 4.1245 E19 * [\epsilon_{VM} (1 \times 10^{-6})]^{-4.9761} \quad (3)$$

## 6. CONCLUSÕES FINAIS

A consideração de variações de temperatura em pavimentos fendilhados reforçados que causem o incremento do estado de tensão global na camada de reforço é particularmente importante para a estimativa da vida útil à reflexão de fendas destas camadas. Verifica-se que

a estimativa de vida útil de um reforço decresce à medida que a temperatura no pavimento também decresce.

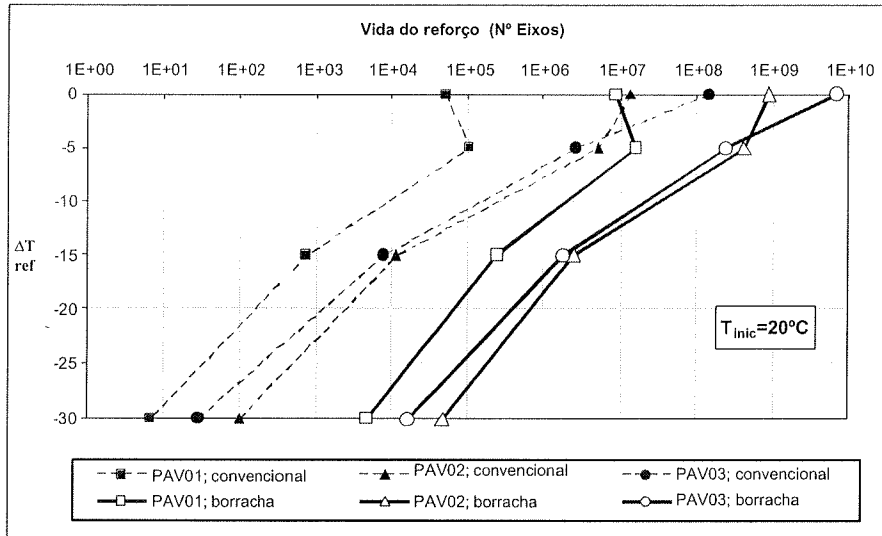


Figura 8. Comparação entre uma mistura convencional e uma mistura de borracha

A análise aqui descrita sugere que, em pavimentos com maior capacidade de carga (mais espessos), as variações de temperatura assumem um papel mais influente na estimativa de vida útil dos reforços de pavimento, que a ação do tráfego. Como conclusão geral sugere-se que a consideração das variações de temperatura das camadas de um pavimento reforçado influenciam significativamente a estimativa de vida à reflexão de fendas do reforço, justificando-se uma especial atenção a este aspecto nos procedimentos de concepção deste tipo de camadas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – 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, Washington, 2002.
- [2] – 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.
- [3] – A. Shalaby, Abd el Halim A.O and O.J. Svec – “Low-temperature stresses and fracture analysis of asphalt overlays”. Proceedings, Transportation Research Record 1539, pp 132-139, Washington, 1990.
- [4] – Minhoto, Manuel; Pais, Jorge C.; Pereira, Paulo A.A.– “A optimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha”. Proceedings p. 257-268. 2º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2002, Lisboa, 2002.
- [5] – Epps, Amy L.– “Thermal behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures”. Dissertation series UCB-ITS-DS-97-2. Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley. ISBN 0192 4109, 1997.