

CONSIDERAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO À REFLEXÃO DE FENDAS DOS REFORÇOS DE PAVIMENTOS

Manuel J. C. Minhoto¹; Paulo Pereira²; Jorge Pais³

¹ Professor Adjunto, minhoto@ipb.pt; Instituto Politécnico de Bragança –Escola Superior de Tecnologia e de Gestão – Campus de Santa Apolónia, Apartado 134, 5301-857 Bragança, Portugal

² Professor Catedrático, ppereira@civil.uminho.pt; Universidade do Minho, Campus de Azurém. Guimarães Portugal. 4800-058

³ Professor Auxiliar, jpais@civil.uminho.pt; Universidade do Minho, Campus de Azurém. Guimarães Portugal. 4800-058

O reforço de pavimentos constitui uma técnica de conservação estrutural na qual se baseiam as estratégias de conservação mais utilizadas na reabilitação dos pavimentos, visando a reposição da sua capacidade estrutural. Quando o reforço é aplicado sobre pavimentos fendilhados ocorre normalmente um mecanismo de ruína caracterizado pela propagação das fendas do pavimento existente para as camadas de reforço, designado por reflexão de fendas. No estudo que se apresenta, procedeu-se a uma avaliação, do efeito das variações de temperatura na ocorrência do mecanismo da reflexão de fendas, considerando a acção actuando isoladamente e actuando conjugada com o efeito da acção do tráfego numa mistura betuminosa com betume-borracha e numa mistura convencional aplicada em reforço de pavimentos. Conclui-se que a ocorrência de variações de temperatura nos pavimentos conduz ao agravamento do fenómeno da propagação de fendas, levando à ruína prematura dos reforços. Por fim apresenta-se uma proposta para a inclusão do efeito da temperatura no dimensionamento de reforços de pavimentos.

Palavras-chave: reforço de pavimento, reflexão de fendas, variações de temperatura, misturas betuminosas

1. Introdução

Na maioria dos países, o tipo de estratégia de conservação mais usado, e considerado o mais adequado em situações de reabilitação estrutural de pavimentos degradados com fendilhamento, baseia-se na aplicação de reforços estruturais sobre pavimentos fendilhados, constituindo uma das estratégias de conservação cujos efeitos conduzem a uma melhoria do estado global do pavimento.

Na maioria dos casos (3) e (5), o desempenho destes reforços não corresponde ao esperado, verificando-se uma transmissão do fendilhamento existente no pavimento degradado para as camadas de reforço, conduzindo ao fendilhamento prematuro na base destas camadas com a consequente propagação para a superfície. Este fenómeno, designado por reflexão de fendas, é causado pela combinação do carregamento cíclico do tráfego com o efeito térmico das variações de temperatura.

A ocorrência de variações de temperatura nos reforços de pavimentos, resultantes das variações diárias da temperatura do ar, constitui uma solicitação que contribui para a propagação do fendilhamento por esta camada (1).

O objectivo do presente estudo é o de contribuir para um melhor entendimento do comportamento dos reforços de pavimentos quando o mecanismo da reflexão de fendas resulta da acção conjunta das variações de temperatura e do tráfego. Trata-se dum estudo sobre reflexão de fendas considerando-se um caso concreto de um pavimento, sujeito ao carregamento térmico e do tráfego verificados durante um ano visando desenvolver uma metodologia de concepção de reforços de pavimento.

2. Âmbito do estudo

O presente estudo baseou-se na realização duma simulação numérica, representativa do comportamento à reflexão de fendas dum reforço de pavimento, quando sujeito à acção do tráfego e de variações de temperatura, utilizando-se a metodologia dos Elementos Finitos (EF).

As solicitações consideradas foram a distribuição de temperaturas em profundidade dum pavimento (gradientes térmicos), observada ao longo de um ano e a acção repetitiva das cargas do tráfego, caracterizada a partir de valores do volume do tráfego observado (com contagens e pesagens) num posto automático localizado numa secção próxima do local de observação das temperaturas.

A simulação do comportamento do reforço de pavimento baseou-se na avaliação dos estados de tensão e de extensão resultantes da ocorrência das referidas solicitações, a partir dos quais foi avaliada a resistência do reforço do pavimento à reflexão de fendas.

A simulação numérica da acção das variações de temperatura consistiu numa modelação mecânica do pavimento considerando um carregamento de longa duração envolvendo essencialmente efeitos da retracção térmica com resposta viscoelástica (relaxação). A simulação da acção do tráfego consistiu numa modelação mecânica do pavimento considerando um carregamento de curta duração - comportamento elástico – com influência do estado térmico.

A avaliação da vida previsível do reforço de pavimento realizou-se considerando o nível de extensão acima da fenda, relacionando-o com a vida à fadiga das misturas envolvidas no reforço (mistura com betume-borracha e mistura convencional). Com base nesta consideração foi avaliada a evolução do dano sofrido pelo reforço do pavimento ao longo do ano em estudo.

Este estudo permitiu ainda definir os procedimentos para obtenção de um método de dimensionamento de reforços de pavimentos que considerem as variações de temperatura, conjuntamente com o tráfego, como as acções responsáveis pela reflexão de fendas.

3. Modelo numérico do pavimento

O modelo utilizado para modelação do comportamento do reforço do pavimento foi constituído pelas seguintes camadas: reforço de pavimento com 0.125 m; camada

betuminosa fendilhada com 0.215 m; camada granular com 0.30 m e camada representativa da fundação com 1.6 m.

O modelo numérico inclui uma fenda, localizada na camada fendilhada do pavimento antigo, à qual é atribuída uma largura de 10 mm.

A discretização mecânica do modelo do pavimento baseou-se na adopção dum elemento finito do tipo sólido de 8 nós, de interpolação linear, que conduziu à malha, representativa do pavimento, que se apresenta na Figura 1. Este elemento apresenta três graus de liberdade em cada nó, traduzidos em translações nodais nas direcções x, y e z, e permite modelar um comportamento viscoelástico das misturas betuminosas (2).

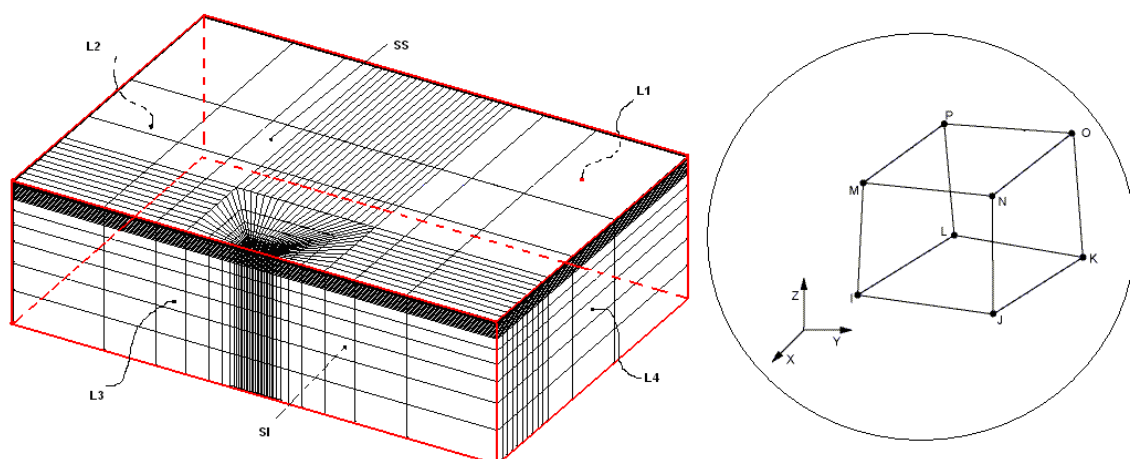


Figura 1 – Discretização do modelo mecânico e elemento finito de 8 nós

3.1 Solicitações

Ao modelo descrito aplicam-se duas principais acções: tráfego e variações de temperatura. A simulação do carregamento do tráfego envolve a aplicação do carregamento de um rodado duplo dum eixo de 130 kN, sendo uma carga distribuída à superfície do pavimento, com um valor de 0.907 MPa. A caracterização do tráfego baseou-se também nos registos de tráfego da Estradas de Portugal (EP) realizadas num posto fixo de medição tráfego, próximo do local de observação das temperaturas.

A simulação da acção térmica traduz o resultado da observação *in situ* das variações de temperatura no pavimento, observadas durante um período de tempo de um ano (2004), numa secção do IP4, no nordeste de Portugal, situada ao km 197.700.

3.2. Tipo de processamento do modelo

O processamento do modelo de EF é diferenciado conforme o tipo de carregamento considerado. No caso do carregamento do tráfego considera-se um carregamento de curta duração mobilizando um comportamento elástico-linear dos materiais betuminosos. Neste caso, a análise numérica realizada pelo modelo é do tipo estacionário para cada estado térmico horário, envolvendo um processamento por cada hora (4).

O carregamento das variações de temperatura é do tipo transiente em que o processamento se realiza em intervalos (de integração) ao longo do período de tempo de 24 horas, mobilizando o comportamento viscoelástico dos materiais betuminosos, em que para cada hora, o estado térmico é caracterizado pela distribuição de temperaturas observadas e a criação dum estado de tensão resulta do fenómeno de retracção térmica.

3.3. Propriedades dos Materiais

As propriedades dos materiais incluídos no modelo de elementos finitos, integrantes da camada de reforço (mistura betuminosa com betume-borracha (BMB) e mistura betuminosa convencional), foram obtidas em ensaios laboratoriais. As propriedades adoptadas para os materiais das restantes camadas resultaram duma caracterização *in situ* do pavimento existente. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades elásticas consideradas para as misturas do reforço, para uma gama de temperaturas, entre -5 °C e +25 °C, e para uma frequência de 10 Hz. São igualmente apresentadas as características da camada betuminosa fendilhada do pavimento antigo.

Tabela 1 – Propriedades das misturas betuminosas de reforço

Temperatura (°C)	Mistura com BMB		Mistura convencional		Mistura betuminosa fendilhada	
	Módulo (MPa)	Coef. Poisson	Módulo (MPa)	Coef. Poisson	Módulo (MPa)	Coef. Poisson
-5	4440	0.35	16160	0.35	12000	0.35
5	3220	0.35	13560	0.35	6500	0.35
15	1950	0.35	9300	0.35	2500	0.35
25	1110	0.35	4780	0.35	680	0.35

A caracterização das propriedades dos materiais do pavimento existente conduziu a um módulo de deformabilidade de 100 MPa para a camada de base granular e de 50 MPa para a fundação do pavimento.

Sendo a acção térmica considerada de longa duração é necessário considerar a termo-viscoelasticidade das misturas betuminosas na avaliação do estado de tensão/extensão, prevendo, assim, fenómenos de relaxação, ou fluência, das misturas perante a retracção térmica.

As propriedades viscoelásticas das misturas, determinadas experimentalmente, foram caracterizadas numa perspectiva da formalização de funções kernel (de relaxação) $G(t)$ (corte) e $K(t)$ (volumétrico), representadas por séries de Prony, de acordo com as seguintes expressões:

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

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

O número de elementos da série de Prony adoptados, n_G e n_K , foi de três, resultando 14 parâmetros das expressões de Prony, (7 de corte (G); 7 – volumétricos (K)). Atendendo ao carácter térmico da simulação considerou-se a aplicação do princípio da simplicidade termo-reológica aos materiais adoptados, expressa pela aplicação do factor de escala $A(T(t))$ de William-Landel-Ferry (WLF):

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

Assim, as propriedades viscoelásticas, obtidas através dos ensaios laboratoriais, conduziram ao estabelecimento dos parâmetros constantes na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades viscoelásticas das misturas – parâmetros de Prony

	Parâmetros	Mistura com BMB	Mistura convencional		Parâmetros	Mistura com BMB	Mistura convencional
Parâmetros de corte	K_{∞}	1.379E+01	2.807E+01	Parâmetros volumétricos	G_{∞}	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
	τ_1^K	6.054E-02	5.853E-01		τ_1^G	6.032E-02	5.991 E-01
	τ_2^K	1.474E+01	9.165E 00		τ_2^G	1.473E+01	9.489E+00
	τ_3^K	9.863E+03	9.922E+03		τ_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				

A realização de ensaios de retracção térmica livre conduziu à obtenção dos valores do coeficiente de retracção térmica para cada tipo de mistura usada na simulação, nomeadamente 4.268×10^{-05} para a mistura com BMB e 3.542×10^{-05} para a mistura convencional.

4. Procedimento de simulação

Os procedimentos envolvidos na simulação numérica visando avaliar o comportamento mecânico dum reforço de pavimento perante a acção combinada das variações de temperatura e do tráfego, apresentam-se no esquema da Figura 2. A simulação numérica da reflexão de fendas assenta em quatro fases: i) avaliação do estado de tensão/extensão devido ao tráfego; ii) avaliação do estado de tensão/extensão devido às variações de temperatura; iii) avaliação do estado de tensão/extensão da combinação das duas acções; iv) determinação da vida previsível do reforço e do dano associado às acções analisadas.

As três primeiras fases do estudo permitem a obtenção dos estados de tensão e extensão nos nós localizados numa zona activa e crítica do reforço, acima da frente

duma fenda. O ciclo elementar de simulação adoptado no estudo assenta numa base horária, mesmo em soluções numéricas aplicadas a ciclos diários, como é o caso das variações de temperatura.

As duas primeiras fases requerem o funcionamento prévio do modelo do comportamento térmico do pavimento, com o objectivo 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 carregamento dum rodado duplo representativo dum eixo padrão de 130 kN, é realizado após a consideração das temperaturas no domínio mecânico no sentido de estabelecer as propriedades termo-mecânicas dos materiais (módulos, etc.).

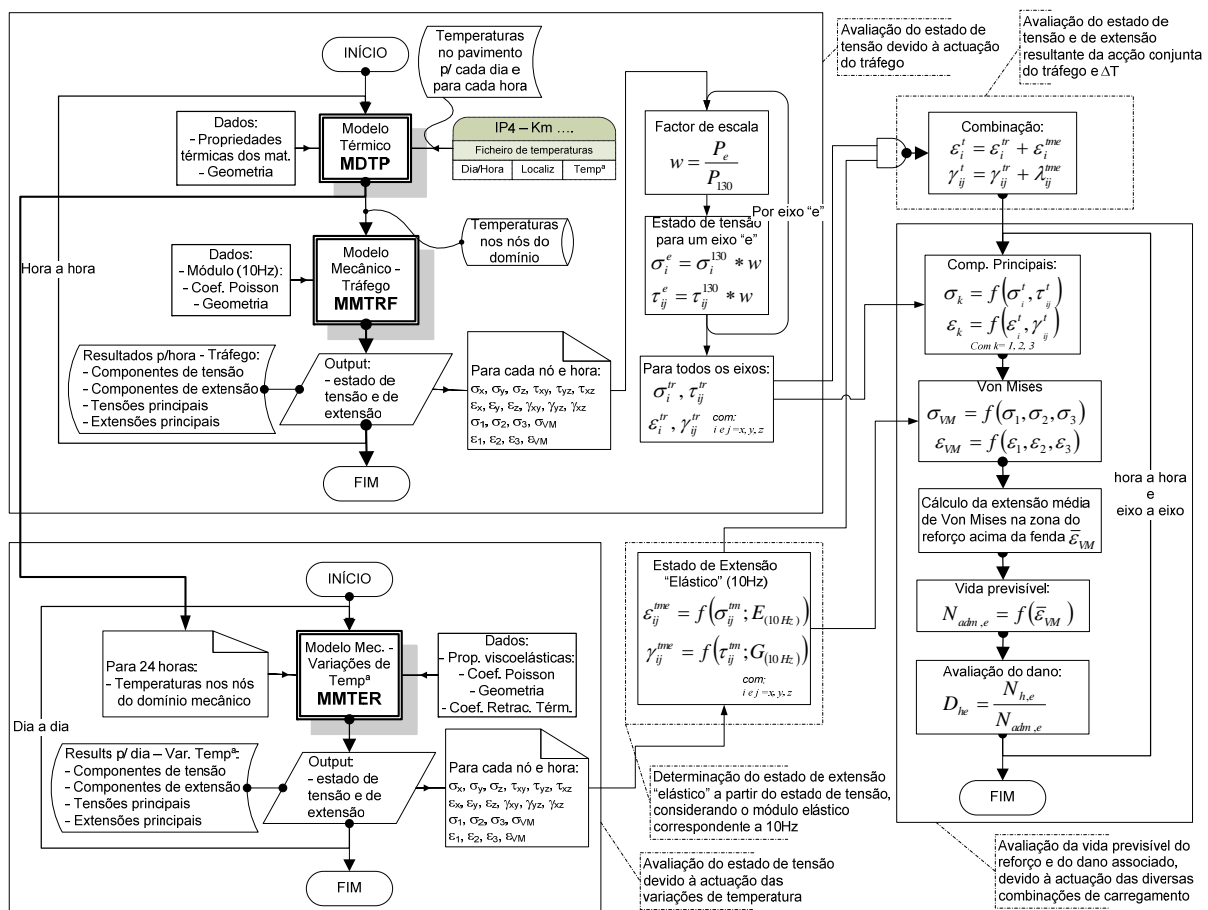


Figura 2 – Procedimento usado na simulação do comportamento do reforço

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, devido à acção 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 obtidas em laboratório com ensaios de fadiga à flexão em 4 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 adopção da metodologia de concepção de reforços de pavimento proposta por Sousa et al, 2002 [11]. Para cada tipo de mistura betuminosa, para cada hora de análise e para cada situação de carregamento, a avaliação do dano envolve: i) determinação das extensões de Von Mises; ii) determinação da extensão de Von Mises média na zona do reforço, acima da fenda; iii) determinação da vida previsível do reforço e iv) determinação do dano.

Assim, em cada nó do modelo, localizado acima da fenda foi calculada, para cada caso de carregamento, a extensão de Von Mises através da expressão:

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

onde: ε_{VM} = extensão de Von Mises;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ = extensões principais.

Com base nos valores de ε_{VM} em cada nó, foi calculada a extensão de Von Mises média nos nós localizados na zona acima da fenda. A extensão média de Von Mises foi, de seguida, usada numa expressão adoptada 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:

$$\varepsilon_{VM} = \left[\left((a \times n) + b \right) \times E^c \times N^d \right] \times (1 + \nu) \quad (5)$$

onde: n = porosidade da mistura (%);

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

N = número de repetições de carga admissível;

ν = coeficiente de Poisson;

a, b, c, d = parâmetros experimentais de fadiga das misturas (Tabela 3).

Tabela 3 – 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, obtidos 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 apresenta a seguinte forma:

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

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 .

Assim, são obtidos, para cada hora de análise, 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

A simulação realizada permitiu obter um conjunto de resultados passíveis de serem analisados sob o ponto de vista da análise das relações entre o estado de extensão, representado pela extensão de Von Mises, e o estado térmico no reforço, representado pela sua temperatura média e sob o ponto de vista da análise do dano associado ao carregamento.

A evolução anual das extensões de Von Mises (Figuras 3 e 4) permite concluir que no período frio do ano a situação de carregamento (tráfego + variações de temperatura) condiciona o comportamento do pavimento. No período quente, constata-se que a situação de carregamento do tráfego conduz ao estado de extensão mais gravoso. Neste período, o carregamento conjunto do tráfego e das variações de temperatura apresenta valores de extensão de Von Mises, consideráveis.

Das figuras em análise conclui-se que o efeito das variações de temperatura deve ser considerado principalmente nos períodos frios do ano, onde a diferença entre o efeito do tráfego e do efeito conjunto do tráfego e das variações de temperatura é mais acentuada, não sendo, no entanto, de desprezar a sua consideração em todo o período de análise.

Nestas figuras constata-se 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 facto de a mistura com BMB apresentar maior capacidade de dissipação de tensões de origem térmica que a mistura convencional.

Na Figura 5 apresenta-se o dano horário ao longo do ano, provocado pelo carregamento do tráfego, num reforço constituído por mistura betuminosa com BMB, constando-se que esse dano horário é considerável durante os meses quentes do ano, sendo o dano ocorrido nestes meses superior ao observado nos meses frios.

A evolução do dano devido à acção do tráfego e do carregamento total apresenta o aspecto do gráfico da Figura 6, constatando-se que o dano provocado pelo

carregamento total é sempre superior ao causado apenas pelo carregamento do tráfego. As observações realizadas são igualmente aplicáveis no caso de o reforço ser constituído por uma mistura convencional.

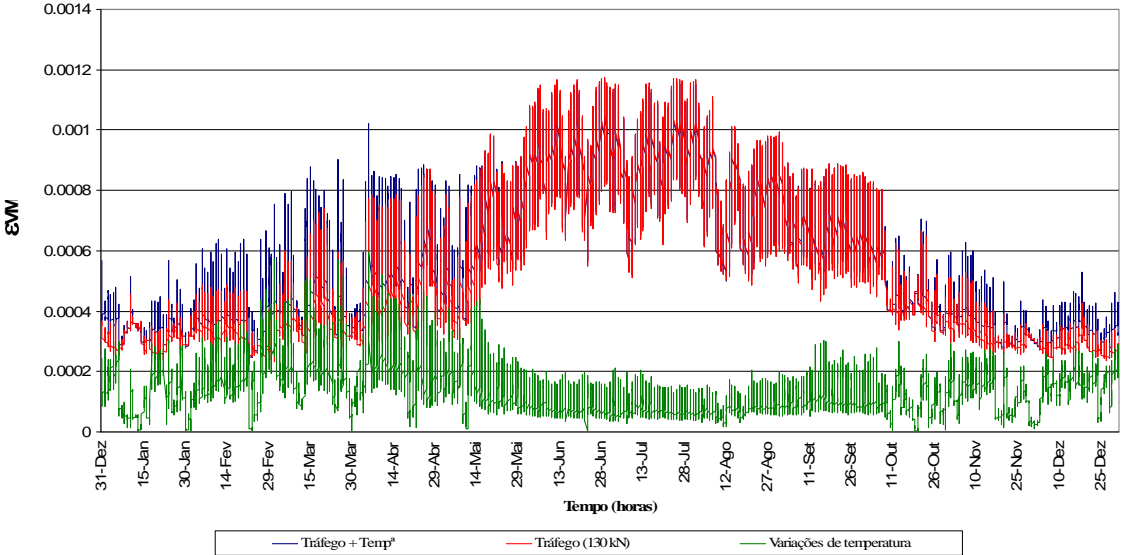


Figura 3 – Extensões de Von Mises anuais no reforço em mistura com BMB

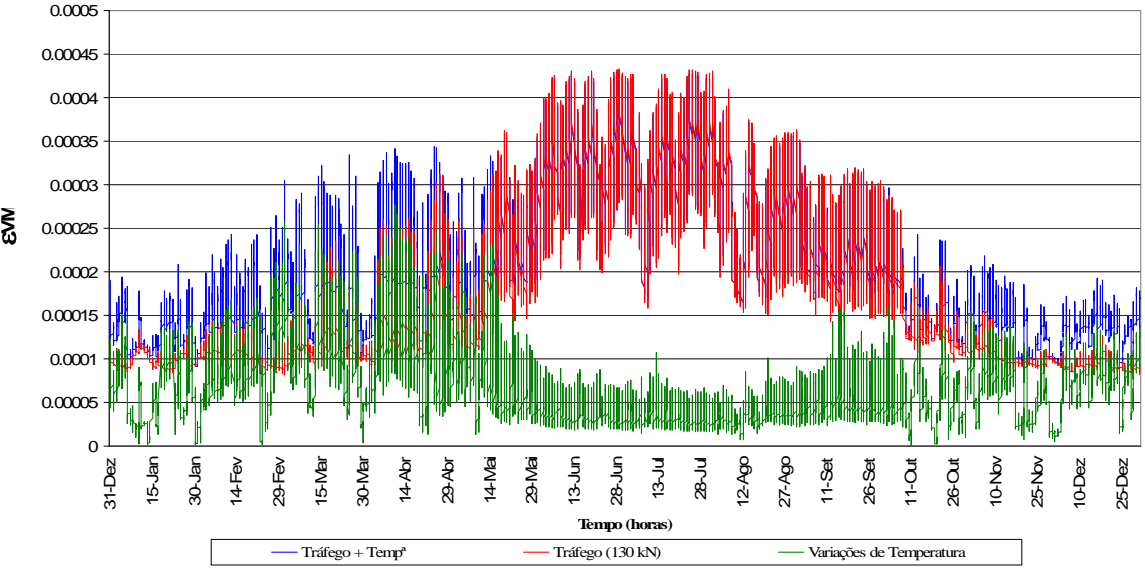


Figura 4 – Extensões de Von Mises anuais no reforço em mistura convencional

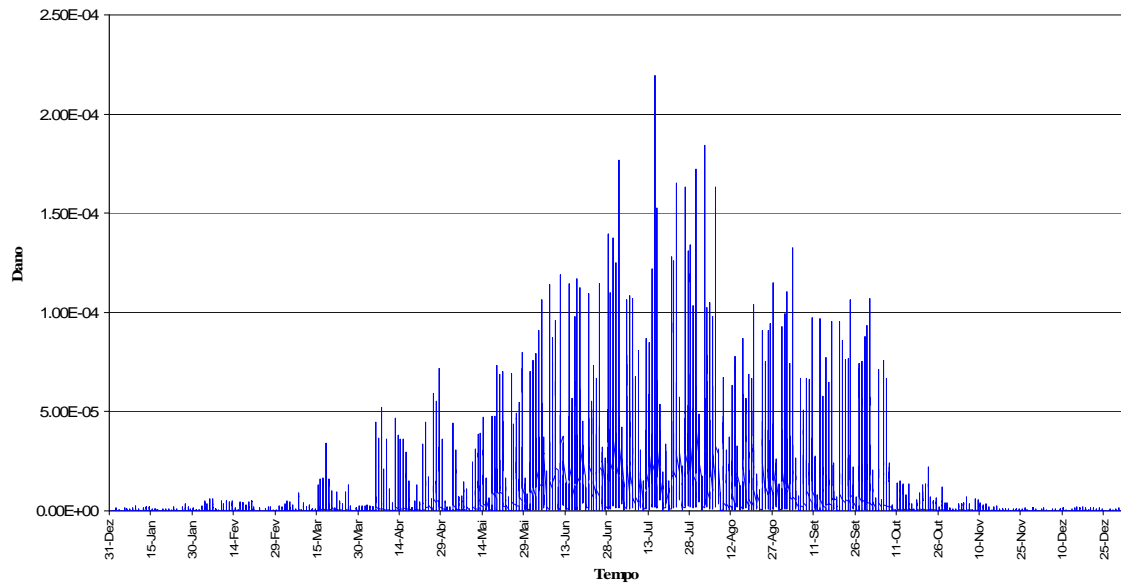


Figura 5 – Dano horário devido ao carregamento do tráfego no reforço com BMB

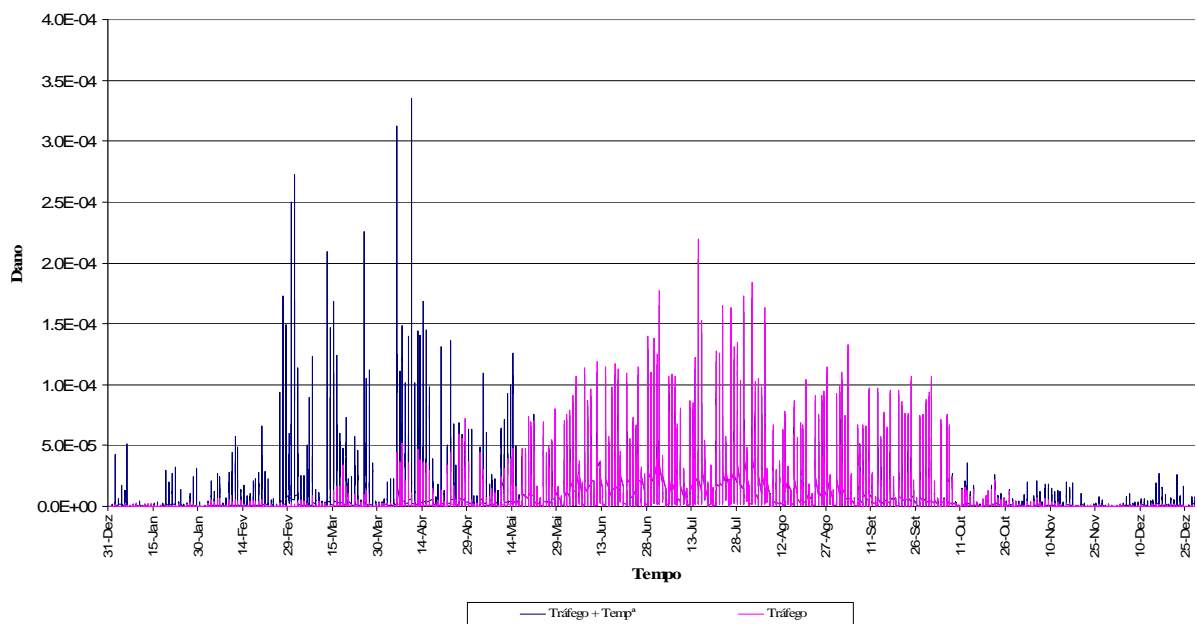


Figura 6 – Dano horário, devido ao carregamento total e ao do tráfego, num reforço com mistura com BMB

Na Figura 7 expressa-se a evolução do dano acumulado no ano, constatando-se que, para a situação de carregamento total, o dano acumulado é superior ao acumulado resultante das situações de carregamento do tráfego, para qualquer tipo de mistura betuminosa. O dano acumulado devido ao carregamento do tráfego é idêntico para os dois tipos de materiais adoptados, verificando-se que a mistura com

BMB apresenta um dano ligeiramente superior. Considerando o carregamento total, verifica-se uma diferença acentuada entre o dano associado aos dois tipos de materiais, com a mistura com BMB a apresentar danos inferiores.

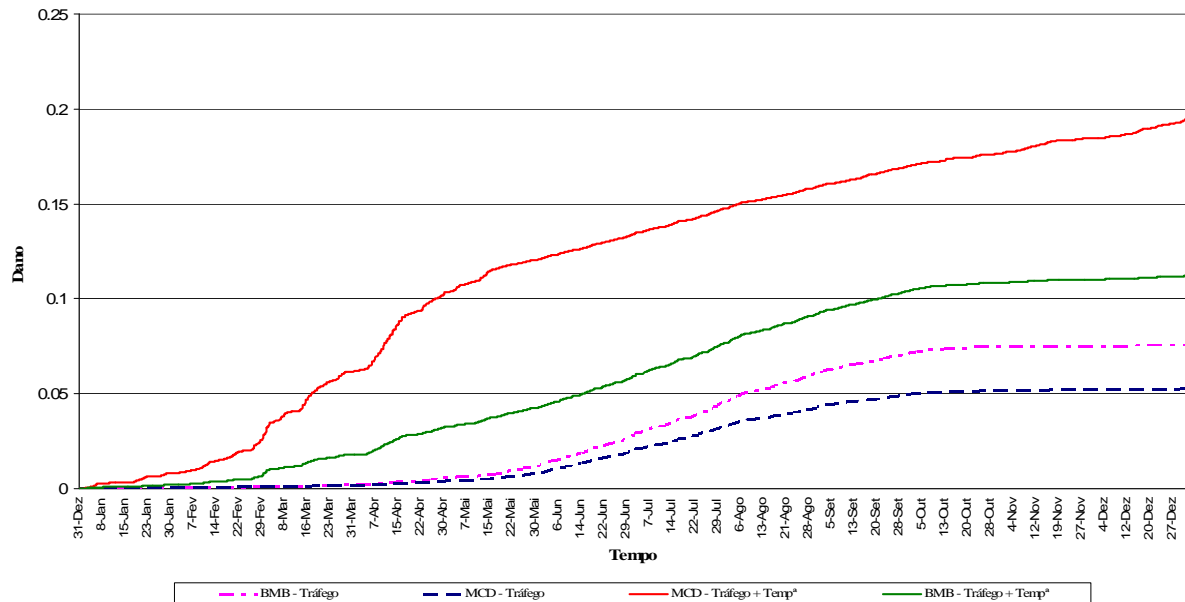


Figura 7 – Dano horário acumulado, devido ao carregamento total e ao tráfego, para os casos de reforço em mistura convencional e mistura com BMB

6. Proposta duma metodologia de dimensionamento

O método de análise apresentado envolve procedimentos complexos e morosos na avaliação do comportamento do reforço de pavimento constituindo uma metodologia de difícil aplicação. Neste sentido, realizou-se um estudo orientado para o estabelecimento de relações de dano de aplicação expeditas e integráveis numa metodologia de dimensionamento de reforços de pavimentos.

Para tal avaliou-se o dano periódico para situações teóricas de carregamento térmico, de padrão regular (situações padrão), correspondentes a carregamentos térmicos em ciclos diários constantes e repetitivos e de rápida avaliação.

Relacionando o dano resultantes destas situações de carregamento teóricas com o dano resultante das situações de carregamento, simuladas anteriormente, correspondentes às condições de carregamento reais e observadas in situ, podem

ser estabelecidos factores de correcção (*shift-factors*) os quais permitem fazer convergir os resultados teóricos com o comportamento mais real dos reforços.

Os danos associados às situações padrão e real foram calculados com base no tráfego efectivamente observado na secção em estudo bem como na distribuição anual e mensal das solicitações térmicas.

As situações teóricas são referenciadas através da adopção de dois valores de temperatura do ar, definidas pelo par de valores (T_{ref} , ΔT): temperatura de referência, T_{ref} , correspondente à temperatura máxima no ciclo diário, e a variação diária da temperatura, ΔT , ficando, com este último valor, implicitamente definida uma temperatura mínima diária do ar.

Para cada situação de carregamento teórica (T_{ref} , ΔT) aplicou-se um procedimento de avaliação do dano idêntico ao apresentado. A partir do dano total obtido para as diversas situações padrão foram deduzidas curvas de dano, cada uma representando a variação do dano, anual ou mensal, com a variação de temperatura, ΔT , para uma dada temperatura de referência, T_{ref} .

A evolução do dano mensal, para cada mês analisado, com a temperatura de referência, T_{ref} , e com as variações de temperatura, ΔT , exhibe uma tendência do tipo exponencial, tendo-se obtido como melhor expressão de ajuste a seguinte equação:

$$dano = a \times T_{ref}^b \times e^{c \times \Delta T} \quad (7)$$

onde: a , b e c = constantes de ajuste à evolução mensal do dano, definidos para cada mês;

T_{ref} = temperatura de referência;

ΔT = variação de temperatura.

Através dum estudo estatístico de ajuste da evolução do dano obtiveram-se as constantes a , b e c , que se apresentam na Tabela 4.

Tabela 4 – Constantes da Expressão (7) para obtenção do dano mensal

	BMB				MCD			
	a	b	c	R ²	a	b	c	R ²
35°C < T _{ref} < 15°C	8.153E-09	4.666E+00	-7.356E-02	9.740E-01	1.770E-06	2.617E+00	-5.653E-02	8.618E-01
15°C < T _{ref} < 5°C	1.412E-05	2.830E+00	-4.034E-02	9.582E-01	8.388E-04	1.199E+00	-1.598E-02	7.814E-01

Com base nos valores do dano reais e teóricos, obtidos para cada período, é possível estabelecer um factor que exprima a relação entre o dano teórico e o dano real, designado por “factor de relação de dano” e definido através da expressão:

$$r = \frac{D_{mensal}^{real}}{D_{mensal}^{teórico}} \quad (8)$$

onde: r = factor de relação de dano entre o dano teórico e o dano real;

D_{mensal}^{real} = dano total mensal resultante da acção do tráfego e das variações de temperatura reais;

$D_{mensal}^{teórico}$ = dano total mensal resultante da acção do tráfego e das variações de temperatura para as situações padrão teóricas.

Na Tabela 5 apresentam-se os valores do “factor de relação de dano” para cada período em análise e para cada tipo de material considerado. Desta tabela constata-se que o factor de relação de dano apresenta valores próximos da unidade para temperaturas médias do ar típicas dos meses quentes. Para os meses frios os factores de relação de dano apresentam alguma dispersão, apresentando na maioria dos casos valores inferiores à unidade.

Tabela 5 – Dano real, dano teórico e factor de relação de dano

Período	Temperaturas do ar				Dano-Carregamento real		Dano-Carregamento teórico		factor (Dr/Dt)	
	T _{ref}	ΔT	T _{min}	T _{média}	BMB	MCD	BMB	MCD	BMB	MCD
Janeiro 04	10.14	8.06	2.08	5.96	0.002123	0.008340	0.007175	0.011862	0.295852	0.703097
Fevereiro 04	11.02	10.67	0.36	5.06	0.004565	0.017382	0.008187	0.012580	0.557551	1.381666
Março 04	11.69	9.95	1.73	6.65	0.011255	0.036154	0.009943	0.013649	1.131896	2.648738
Abril 04	15.69	13.13	2.56	9.41	0.014617	0.041459	0.020128	0.018468	0.726215	2.244931
Maio 04	19.68	12.29	7.39	13.68	0.009999	0.017202	0.003599	0.002151	2.778529	7.995755
Junho 04	28.13	15.22	12.91	20.99	0.015904	0.012995	0.015363	0.004643	1.035240	2.798691
Julho 04	27.68	15.17	12.51	20.58	0.018068	0.013910	0.014293	0.004463	1.264046	3.116920
Agosto 04	25.78	11.49	14.29	20.30	0.015703	0.011692	0.013446	0.004562	1.167871	2.563000
Setembro 04	25.16	16.46	8.70	16.62	0.011986	0.010663	0.008329	0.003232	1.439053	3.298987
Outubro 04	16.75	9.12	7.63	11.98	0.004263	0.006598	0.002143	0.001688	1.989442	3.907951
Novembro 04	10.09	9.13	0.97	4.95	0.001759	0.008147	0.006787	0.011599	0.259251	0.702365
Dezembro 04	9.08	9.45	-0.37	3.81	0.001884	0.010155	0.004970	0.010169	0.379012	0.998642
Anual	20.80	13.15	7.65	14.27	0.112125	0.194697	0.052061	0.524624	2.153718	0.371117

Na Figura 8 apresenta-se, numa forma generalizada, a proposta dum processo de dimensionamento, resultante da análise do estudo realizado. Este processo prevê a inclusão das fases de dimensionamento que se apresentam no esquema, e que serão: i) fase de definição de dados; ii) fase de obtenção do dano diário no reforço; iii) fase de avaliação do comportamento do reforço.

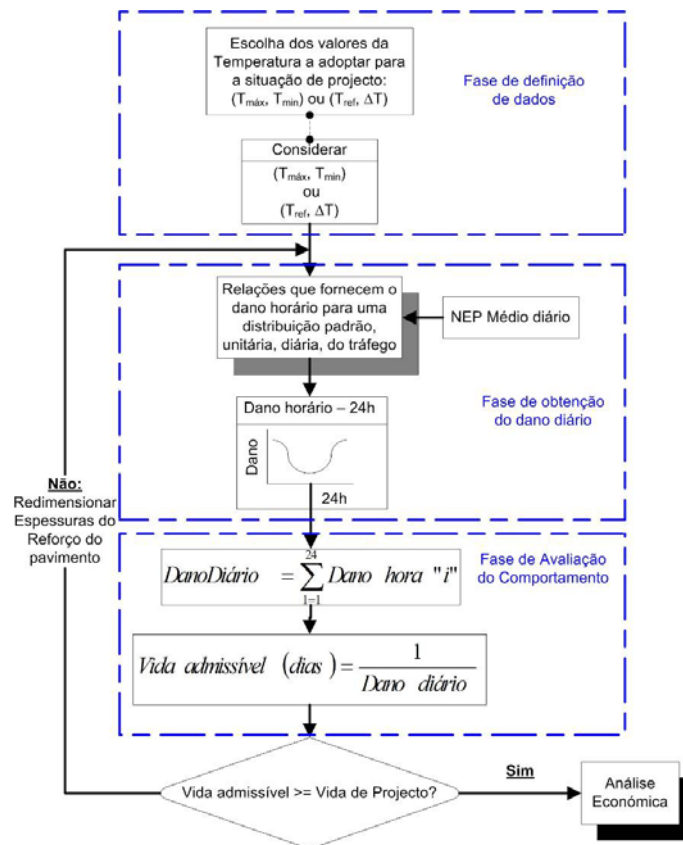


Figura 8 – Processo de dimensionamento do reforço de um pavimento

A fase de definição de dados consiste no estabelecimento das condições térmicas: i) distribuição diária de temperaturas; ii) distribuição diária da radiação solar; iii) velocidade média do vento à superfície do pavimento. A estas condições térmicas são associados os parâmetros que caracterizam o carregamento térmico: T_{ref} e ΔT .

A fase de avaliação do dano horário para 24 horas (dano diário) consiste na aplicação de relações que explicitem o mesmo resultado que se obtém actualmente com as fases de avaliação térmica, avaliação mecânica e de avaliação do dano.

Este tipo de relações deverá permitir obter um perfil diário de danos horários de uma forma explícita, determinados para um tráfego unitário e com uma distribuição horária padrão ao longo dum dia. O dano horário assim obtido para cada hora, quando multiplicado pelo número de eixos padrão médio diário, deverá constituir o dano horário ao longo de 24 horas a considerar no processo de dimensionamento.

A fase de avaliação do comportamento do reforço consiste em verificar o comportamento do reforço através da imposição do cumprimento da condição de a vida admissível para o reforço ser maior ou igual à vida de projecto imposta, partindo dos valores conhecidos do dano horário durante 24 horas, avaliando o somatório do dano ocorrido a todas as horas do dia. A quantidade de dias a que o reforço pode resistir é dada pela relação:

$$Vida\ admissível(dias) = \frac{1}{Dano\ diário} \quad (9)$$

O número de dias associado à vida de projecto é dado pela seguinte relação, sendo NEP o número de eixos padrão médio diário:

$$Vida\ projecto = \frac{NAEP}{NEP_{medio\ diário}} \quad (10)$$

onde: NAEP = Número equivalente de eixos padrão para o período de projecto.

A vida admissível do reforço deve ser comparada com a vida de projecto permitindo a decisão de redimensionar o reforço, para o caso de a vida previsível ser inferior à vida de projecto, ou de considerar o processo de dimensionamento terminado avançando para a avaliação económica de alternativas.

7. Conclusões

No presente trabalho considerou-se que o fenómeno da reflexão de fendas constitui uma das causas principais do fendilhamento prematuro dos reforços de pavimentos, devendo-se este fenómeno, sobretudo, à elevada concentração de tensões, na zona acima das fendas das camadas existentes.

Estas tensões são provocadas pelos movimentos dos bordos das fendas, resultantes da acção do tráfego e das variações de temperatura, sendo usual considerar-se como acção principal a resultante da actuação do tráfego. O efeito conjugado do tráfego e das variações de temperatura no fenómeno da reflexão de fendas constitui a acção mais desfavorável para a ocorrência daquele fenómeno.

Do estudo apresentado concluiu-se que a variação horária do estado térmico do pavimento apresenta uma influência significativa na variação do seu estado de extensão, qualquer que seja o tipo de carregamento considerado (tráfego, variações de temperatura ou a sua conjugação). Com a redução da temperatura média no reforço (arrefecimento), o estado de extensão horário agrava-se como resultado da retracção térmica qualquer que seja o material da camada de reforço.

No período mais frio do ano, a situação de carregamento total condiciona o comportamento do reforço do pavimento, exibindo maiores extensões de Von Mises relativamente às do tráfego. Neste período, o estado de extensão devido ao tráfego assume valores muito menores que o devido ao carregamento total, enquanto que as extensões devido às variações de temperatura apresentam os valores mais altos.

No período mais quente do ano, o carregamento total condiciona igualmente o fenómeno de reflexão de fendas, conduzindo a maiores extensões. No entanto é neste período do ano que o estado de extensão produzido pelo tráfego assume valores mais elevados, ao contrário do carregamento térmico.

O dano horário produzido pelo tráfego, durante os meses quentes do ano, apresenta valores muito superiores ao 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 devido à acção do carregamento total é superior ao período de tempo onde 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.

O dano acumulado ao longo do ano num reforço com uma mistura betuminosa com BMB é inferior ao dano acumulado por um reforço com mistura betuminosa convencional. Para a situação de carregamento total existe uma diferença muito acentuada no dano entre os dois tipos de materiais, sendo que a mistura betuminosa com betume modificado com borracha conduz a valores do dano inferiores. Este facto indica que as misturas betuminosas com BMB podem constituir boas soluções para o retardamento da reflexão de fendas nos reforços de pavimentos.

No presente estudo conclui-se ainda da possibilidade de estabelecer relações numéricas entre os danos real e teórico, expressas por curvas de tendência para condições de carregamento mais generalizadas. Assim, foi proposta uma metodologia para o dimensionamento de reforços de pavimentos, apontando-se uma possibilidade de evolução dessa metodologia no sentido dum uso generalizado e simplificado.

8. Bibliografia

1. Minhoto, Manuel J. C., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A.A. & Picado-Santos, Luís G.. "Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Model". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board nº 1919 – Rigid and Flexible Pavement Design 2005. Pps 96-110. TRB. Washington DC. 2005.
2. Minhoto, Manuel J.C., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A.A. & Picado-Santos, Luís G., "Low-Temperature Influence in the Predicted of Pavement Overlay", Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia, Brasil, 2003, p. 167-180.
3. Sousa, Jorge B., Pais, Jorge C., Saim, Rachid, Way, George & Stubstad, Richard N 2001. Development of a Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking, Journal of the Transportation Research Board, 2002.
4. Sousa J. B., Pais, J., Rachid Saïm "The effect of mode of loading on the comparison between asphalt rubber and traditional hot mixes laboratory performance", Asphalt Rubber 2000 – Proceedings, Vilamoura. 2000
5. Way, G., 2003. *OGFC meets CRM. Where rubber meets the rubber 15 years of durable success*. Proceedings - Asphalt Rubber 2003 Conference. Jorge B. Sousa (ed). Brasilia, Brazil. pp. 49-63