

DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA CONSIDERAÇÃO DA TEMPERATURA NO DIMENSIONAMENTO DE 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

RESUMO

No presente trabalho apresenta-se o estudo conducente ao desenvolvimento de um modelo para consideração da temperatura no dimensionamento de reforços de pavimentos à reflexão de fendas. O efeito da temperatura do pavimento é considerado através da definição de temperaturas médias diárias e variações de temperatura, esta última responsável pelo fenómeno da retracção e relaxação.

Neste trabalho apresenta-se o resultado duma análise baseada na utilização da metodologia dos elementos finitos (3D) aplicada na previsão da vida (tempo de serviço) de um reforço de pavimento colocado sobre um pavimento fendilhado, considerando a conjugação das acções das variações de temperatura e do tráfego.

Os resultados obtidos permitem avaliar a influência das variações de temperatura no tempo de serviço previsto de um reforço em função das condições térmicas. Apresenta-se neste trabalho ainda a comparação entre o tempo de serviço de um reforço considerando apenas a acção do tráfego e o tempo de serviço resultante da conjugação do tráfego com as variações térmicas.

Finalmente é apresentada uma metodologia que permite a consideração das variações de temperatura no dimensionamento de reforços de pavimentos à reflexão de fendas.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objectivo contribuir para um melhor entendimento do comportamento dos reforços de pavimentos à reflexão de fendas resultante da acção conjunta das variações de temperatura e do tráfego. Trata-se dum estudo que considera um pavimento real, sujeito ao carregamento térmico e de tráfego, verificados durante o ano de 2004. Nele

são determinados os estados de tensão e de extensão no reforço, resultantes da aplicação dos dois tipos de carregamento: acção das cargas dos veículos e as variações de temperatura observados na 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.

Pretende-se com este estudo apresentar uma contribuição para o desenvolvimento de metodologias expeditas de concepção de reforços de pavimento, as quais permitam considerar o carregamento térmico no processo de dimensionamento.

2. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

O trabalho realizado consistiu numa simulação numérica, através da metodologia dos elementos finitos (MEF), do comportamento à reflexão de fendas dum reforço de pavimento, tendo como acções o tráfego e as variações de temperatura. As acções consideradas correspondem às solicitações efectivamente observadas num troço de pavimento situado no nordeste de Portugal (IP4), concretamente a distribuição de temperaturas no pavimento, em profundidade e observadas ao longo do ano de 2004. Foi considerada também e a acção repetitiva das cargas do tráfego, caracterizada a partir de valores do volume do tráfego observado (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 do efeito das variações de temperatura consistiu na modelação do comportamento mecânico do pavimento à reflexão de fendas aplicando um carregamento térmico de longa duração, envolvendo o correspondente efeito da retracção térmica com resposta viscoelástica (relaxação). A simulação da acção do tráfego consistiu na modelação do comportamento mecânico do pavimento aplicando um carregamento mecânico de curta duração (comportamento elástico) considerando a influência do estado térmico nas propriedades dos materiais.

A avaliação da vida previsível do reforço de pavimento baseou-se no uso do nível de extensão acima da fenda, relacionando-o com a vida à fadiga das misturas envolvidas no reforço. Com base nesta consideração foi avaliada a evolução do dano sofrido pelo reforço do pavimento ao longo do ano em estudo.

3. MODELAÇÃO DO PAVIMENTO

Foi desenvolvido um modelo numérico de elementos finitos, representativo do pavimento real, em termos geométricos, por adopção das espessuras das camadas obtidas de carotagens realizadas ao pavimento no local de observação das temperaturas. As espessuras atribuídas às camadas do modelo foram: 0.125 m para o reforço de pavimento, 0.215 m para a camada betuminosa fendilhada, 0.30 m para a camada granular e 1.6 m para a camada representativa da fundação. O modelo numérico inclui uma fenda, localizada na camada fendilhada do pavimento antigo à qual é atribuída uma largura de 10 mm.

O modelo apresenta um tipo de processamento diferenciado, conforme o carregamento considerado (tráfego ou variações de temperatura).

As propriedades dos materiais do reforço, consideradas no modelo de elementos finitos, foram obtidas a partir de ensaios laboratoriais para uma gama de temperaturas, entre -5 °C e +25 °C, e para uma frequência de 10 Hz. As propriedades dos materiais da fundação do pavimento foram extraídas do estudo de reabilitação do pavimento localizado no troço onde se efectuaram as observações de temperaturas.

No caso do modelo com consideração da acção térmica, de longa duração, adoptou-se uma caracterização das propriedades termo-viscoelásticas das misturas betuminosas, prevendo fenómenos de relaxação, ou fluência, das misturas associados à retracção térmica. As propriedades viscoelásticas, obtidas através de ensaios laboratoriais de relaxação podem ser obtidas em Minhoto (2007).

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação numérica do comportamento do reforço do pavimento, perante as acções consideradas, desenvolveu-se em quatro fases: i) avaliação do estado de tensão/extensão no reforço devido à acção do tráfego; ii) avaliação do estado de tensão/extensão devido à acção das variações de temperatura; iii) avaliação do estado de tensão/extensão devido à acção combinada do tráfego e das variações de temperatura; iv) determinação da vida previsível do reforço e do dano associado a cada acção considerada.

A avaliação do dano horário associado à reflexão de fendas é realizada com base na: i) determinação das extensões de Von Mises; ii) determinação da extensão de Von Mises média na zona do reforço, acima da frente da fenda; iii) determinação da vida previsível do reforço e iv) determinação do dano.

A extensão média de Von Mises foi 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:

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

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 1).

Tabela 1 – 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:

$$D_{h,e} = \frac{N_{h,e}}{N_{adm,h,e}} \quad (2)$$

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 .

Nas Figuras 1 e 2, 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 3 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.

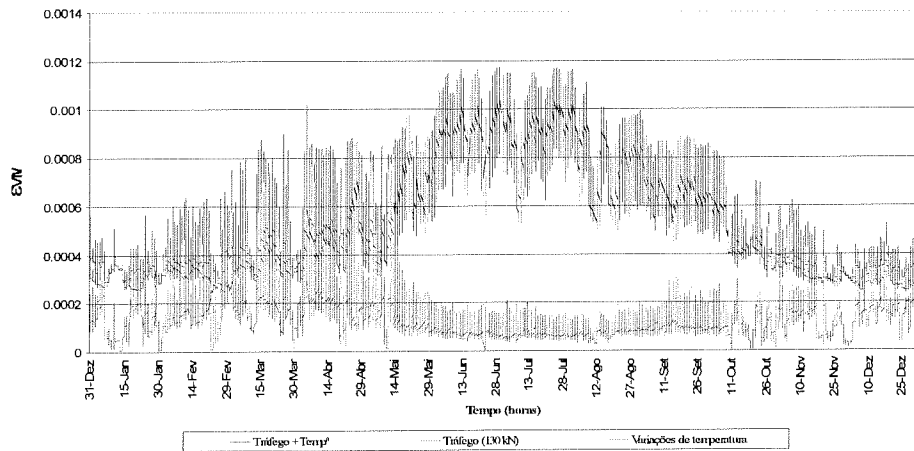


Figura 1 – Extensões de Von Mises anuais no reforço em mistura com BMB

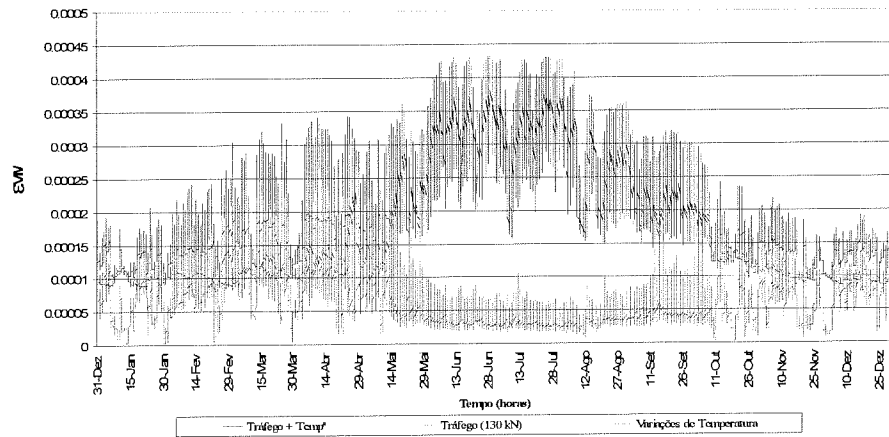


Figura 2 – Extensões de Von Mises anuais no reforço em mistura convencional

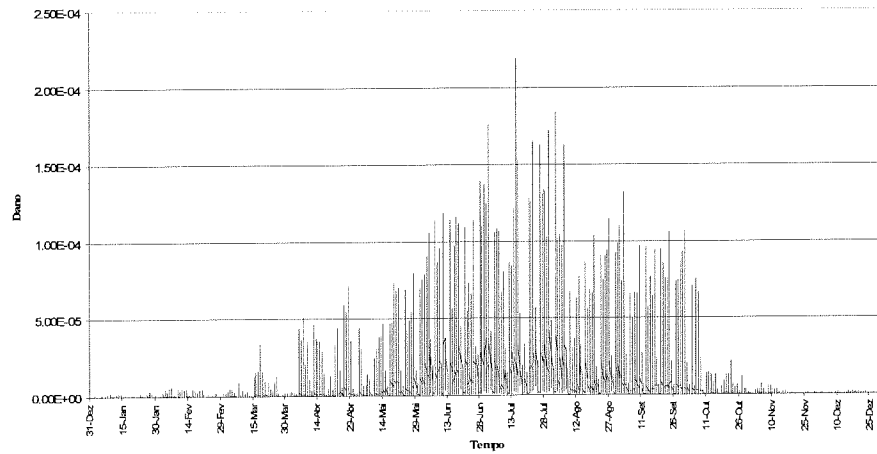


Figura 3 – Dano horário devido ao carregamento do tráfego no reforço com BMB

A evolução do dano devido à acção do tráfego e do carregamento total apresenta o aspecto do gráfico da Figura 4, 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.

O gráfico da Figura 5 expressa 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.

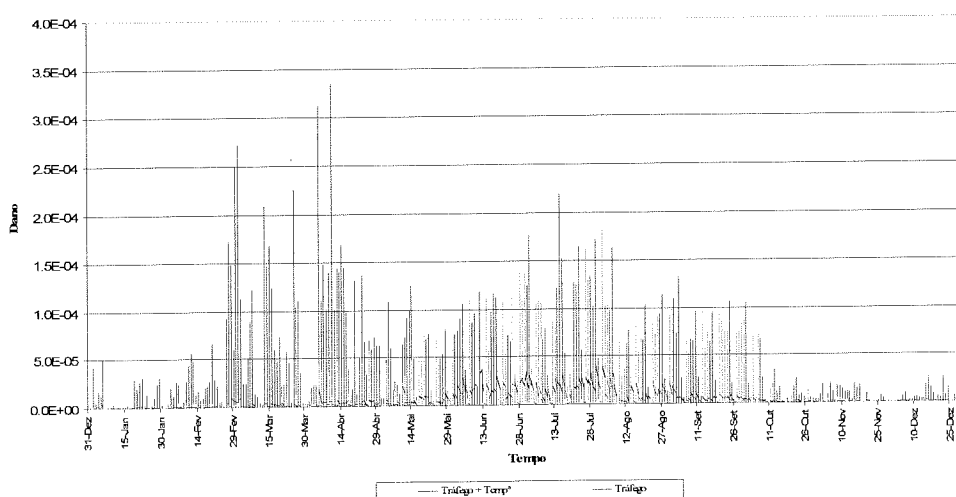


Figura 4 – Dano horário, devido ao carregamento total e ao do tráfego, num reforço com mistura com BMB

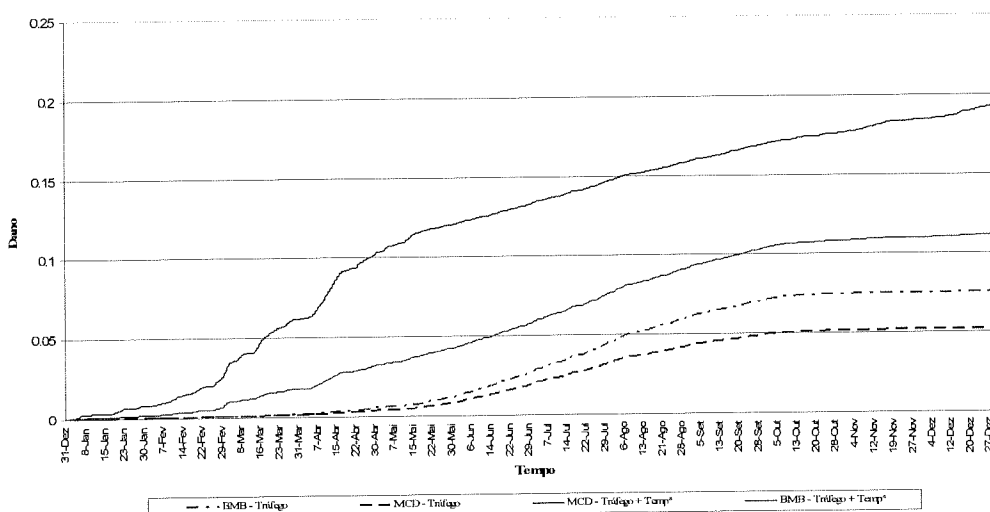


Figura 5 – Dano horário acumulado, devido ao carregamento total e ao tráfego, para os casos de reforço em mistura convencional e mistura com BMB

Da análise dos resultados obtiveram-se os danos mensal e anual, que se apresentam na Tabela 2. Estes valores do dano são indexados aos valores da temperatura do ar efectivamente observados. A temperatura de referência, T_{ref} , foi associada à média das temperaturas máximas diárias do ar observadas em cada período de análise. Por sua vez, a temperatura mínima de análise, T_{min} , foi associada à média das temperaturas mínimas do ar observadas, sendo considerada a diferença algébrica entre estes como a variação de temperatura, ΔT .

Tabela 2 – Dano mensal e anual - condições de carregamento reais

Período	Temperaturas do ar				Dano-Carregamento real	
	T_{ref}	ΔT	T_{min}	$T_{média}$	BMB	MCD
Janeiro 04	10.14	8.06	2.08	5.96	0.002123	0.008340
Fevereiro 04	11.02	10.67	0.36	5.06	0.004565	0.017382
Março 04	11.69	9.95	1.73	6.65	0.011255	0.036154
Abril 04	15.69	13.13	2.56	9.41	0.014617	0.041459
Mai 04	19.68	12.29	7.39	13.68	0.009999	0.017202
Junho 04	28.13	15.22	12.91	20.99	0.015904	0.012995
Julho 04	27.68	15.17	12.51	20.58	0.018068	0.013910
Agosto 04	25.78	11.49	14.29	20.30	0.015703	0.011692
Setembro 04	25.16	16.46	8.70	16.62	0.011986	0.010663
Outubro 04	16.75	9.12	7.63	11.98	0.004263	0.006598
Novembro 04	10.09	9.13	0.97	4.95	0.001759	0.008147
Dezembro 04	9.084	9.45	-0.37	3.81	0.001884	0.010155
Anual	20.8	13.15	7.65	14.27	0.112125	0.194697

5. CONTRIBUIÇÃO PARA UMA METODOLOGIA DE CONCEPÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS

O método de análise anteriormente apresentado envolve procedimentos complexos e morosos, para a avaliação do comportamento do reforço de pavimento, constituindo uma metodologia de difícil aplicação expedita e generalizada no dimensionamento de reforços de pavimento. Neste sentido, realizou-se um estudo orientado para o estabelecimento de relações de dano de aplicação expedita e integrável 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 estabelecidas factores de correcção (shift factors) os quais permitam 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 considerada 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 neste trabalho. 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} .

Nas Figuras 6.a) e 6.b) representam-se as diversas curvas de dano anual obtidas, respectivamente, para um reforço em mistura betuminosa com BMB e para um reforço com mistura betuminosa convencional. Estas curvas foram obtidas a partir do dano anual resultante da acção conjunta das variações de temperatura e do tráfego.

Nas Figuras 7.a) e 7.b) são apresentadas diversas curvas de dano anual, obtidas para um reforço em mistura betuminosa com BMB e com mistura betuminosa convencional respectivamente, considerando exclusivamente a acção das variações de temperatura no pavimento. Comparando os desempenhos dos dois materiais adoptados, as curvas de dano anual foram representadas para duas temperaturas de referência ($T_{ref}=35^{\circ}\text{C}$ e $T_{ref}=15^{\circ}\text{C}$) nas Figuras 8 a) e 8 b).

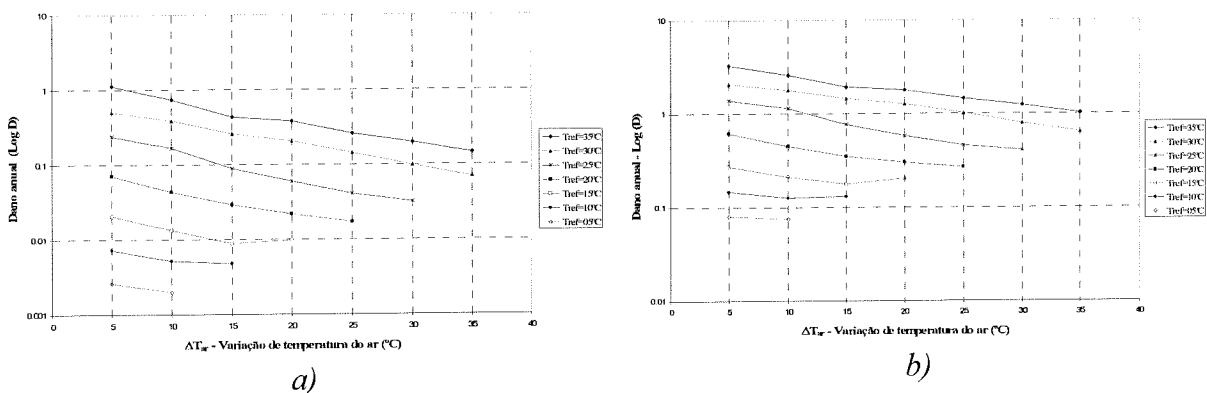


Figura 6 – Variação do dano anual com a temperatura de referência e com as variações de temperatura: a) mistura com BMB; b) mistura convencional

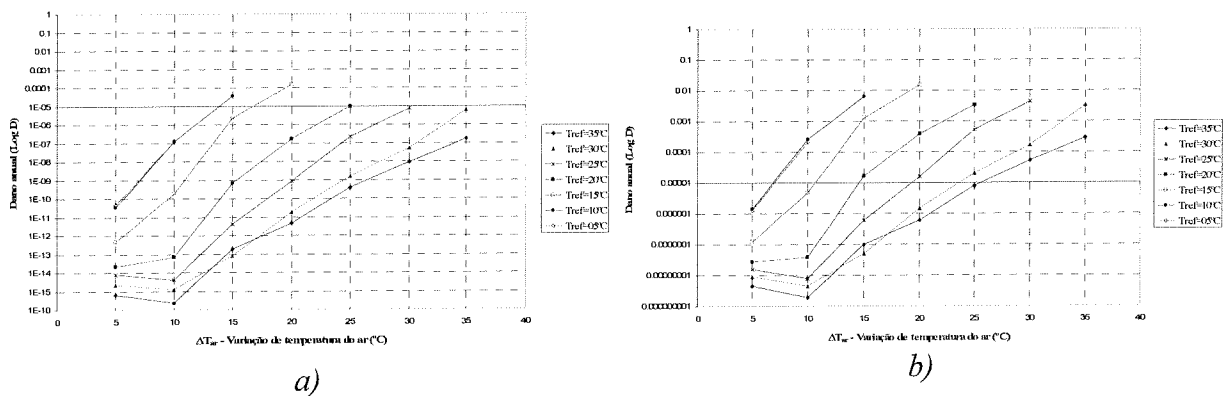


Figura 7 – Variação do dano anual resultante exclusivamente da acção das variações de temperatura: a) mistura com BMB; b) mistura convencional

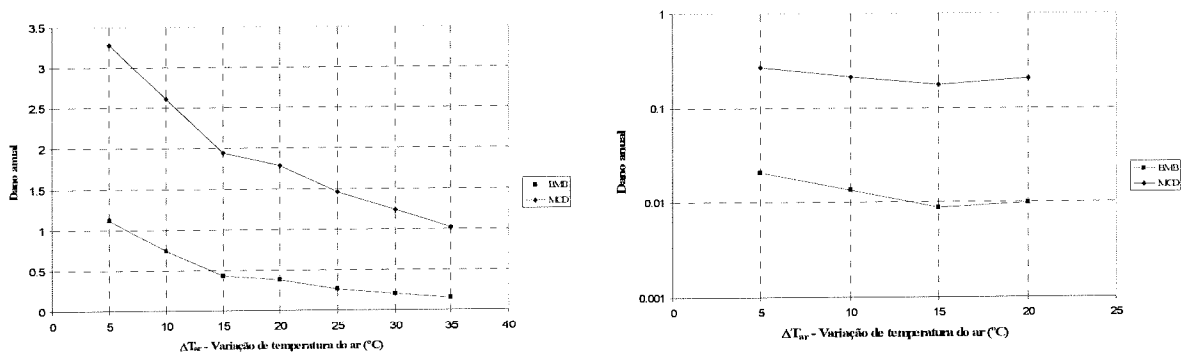


Figura 8 – Variação do dano anual com a variação de temperatura para os dois tipos de misturas e para temperaturas de referência de: a) 35 °C; b) 15 °C.

Constata-se que as misturas com BMB conduzem a danos anuais inferiores às misturas betuminosas convencionais, para qualquer temperatura de referência. 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:

$$dano = a \times T_{ref}^b \times e^{c \times \Delta T} \quad (3)$$

onde: a , b , 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 , baseado no ajuste da Expressão (3), ao dano associado aos diversos valores de (T_{ref} , ΔT), que se apresentam na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes da Expressão (3) para obtenção do dano

	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:

$$r = \frac{D_{mensal}^{real}}{D_{mensal}^{teórico}} \quad (4)$$

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

D_{mensal}^{real} = dano total real mensal, resultante do tráfego e de ΔT ;

$D_{mensal}^{teórico}$ = dano total mensal, resultante do tráfego e de ΔT nas situações padrão teóricas.

Na Tabela 4 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 4 – 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
Maió 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
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	0.702369
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

5.1 Proposta duma metodologia de dimensionamento

Tendo por base a evolução do dano do pavimento perante condições padrão neste trabalho apresenta-se uma proposta de metodologia de dimensionamento de reforços de pavimentos baseada nas seguintes fases: obtenção do dano diário no reforço e avaliação do

comportamento do reforço. A fase de definição de dados consiste no estabelecimento das condições térmicas: distribuição diária de temperaturas, distribuição diária da radiação solar e da 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, ou expressões, que explicitem o mesmo resultado que se obtém actualmente com as fases de avaliação térmica, avaliação mecânica e de avaliação do dano, explicitadas no sub-capítulo anterior. Este tipo de relações deverão 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:

$$Vida\ admissível(dias) = \frac{1}{Dano\ diário} \quad (5)$$

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

$$Vida\ projecto = \frac{NAEP}{NEP\ medio\ diário} \quad (6)$$

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.

6. CONCLUSÕES

Do estudo realizado concluiu-se que 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 retracção térmica, qualquer que seja o material constituinte da camada de reforço.

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.

No presente estudo conclui-se 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, comparativamente com a metodologia actualmente adoptada neste

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Minhoto, Manuel J.C. 2007. *Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.