

REVISTA

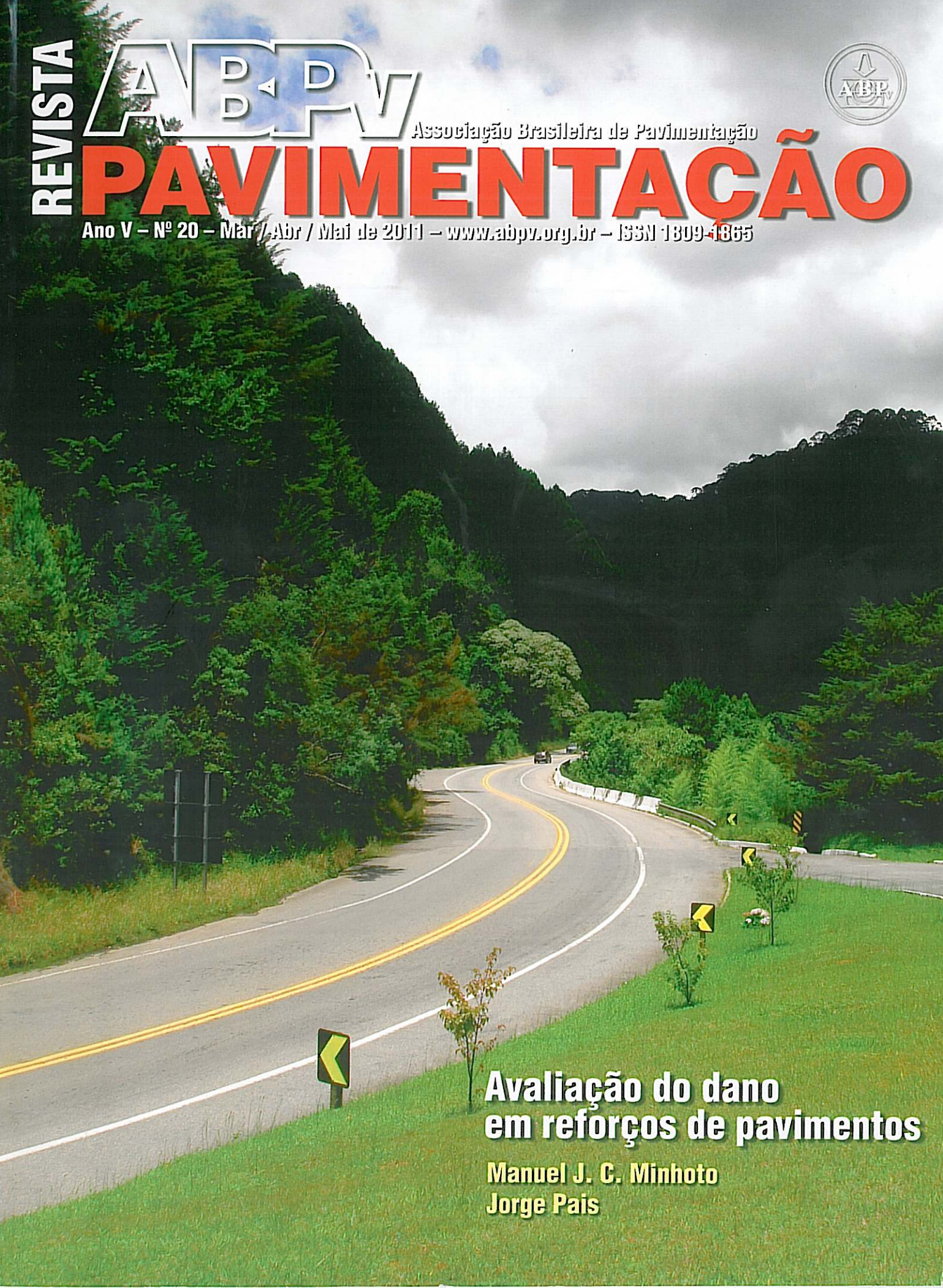
ABRPV

Associação Brasileira de Pavimentação



PAVIMENTAÇÃO

Ano V – Nº 20 – Mar / Abr / Mai de 2011 – www.abpv.org.br – ISSN 1809-4865



**Avaliação do dano
em reforços de pavimentos**

**Manuel J. C. Minhoto
Jorge Pais**



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

CONSELHO EDITORIAL

Diretoria da ABPv

COORDENAÇÃO GERAL

Arq^{ta} Georgina Libório Azevedo
georgina@abpv.org.br

JORNALISTA RESPONSÁVEL

Jean Pierre M. Santiago
MTb 27170-RJ

redacao@revistapavimentacao.org.br

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO

Presidente: Eng^o JOSÉ PEDRO DOS SANTOS VIEIRA COSTA

Vice-Presidente: Eng^o EDUARDO ALBERTO RICCI

Diretor Administrativo: Eng^o FERNANDO AUGUSTO JÚNIOR

Diretor Técnico: Eng^o MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

Diretor Financeiro: Arq^{ta} GEORGINA LIBÓRIO AZEVEDO

Diretor de Divulgação: Eng^o CRISTIANO DA COSTA MOREIRA

COMITÊ TÉCNICO-CIENTÍFICO

Eng^o Alfredo Monteiro de Castro Neto; Eng^o Antônio Fortunato Marcon; Eng^o Armando Morilha Junior; Eng^o Atahualpa Schmitz da S. Prego; Eng^o Carlos Yukio Suzuki; Eng^o Cássio Eduardo Lima de Paiva; Eng^o Cristiano da Costa Moreira; Eng^o Djalma Rocha A. M. Pereira; Eng^o Douglas Fadul Villibor; Eng^o Dulcevir Guerreiro Vilar de Melo; Eng^o Edinaldo Afonso Marques de Mélo; Eng^o Eduardo Alberto Ricci; Eng^o Fernando Augusto Jr.; Eng^o Genésio Almeida da Silva; Arq^{ta} Gilda Collet Bruna; Eng^o Glicério Trichês; Eng^o Heitor Roberto Giampaglia; Eng^o Jacques de Medina; Eng^o João Menescal Fabrício; Eng^o João Virgílio Merighi; Eng^o Jorge Augusto Pereira Ceratti; Eng^o José Pedro dos Santos Vieira Costa; Eng^o José Leomar Fernandes Junior; Eng^o José Tadeu Balbo; Eng^a Laura M^a Goretti da Motta; Eng^a Leni F. M. Leite; Eng^o Leto Momm; Eng^a Liedi Legi B. Bernucci; Eng^a Luciana Nogueira Dantas; Eng^o Luiz Miguel de Miranda; Eng^o Marcello Roberto Rangel Pestana; Eng^o Márcio Muniz de Farias; Eng^o Marílio Augusto Neves; Eng^a Maria da Conceição M. Azevedo; Eng^o Michéle Dal Toé Casagrande; Eng^o Nilton de Souza Campelo; Eng^o Paulo Romeu Assunção Gontijo; Eng^a Prepredigna D. E. Almeida da Silva; Eng^a Rita Moura Fortes; Eng^o Silvio Rodrigues Filho; Eng^o Saul Birman; Eng^o Walter Canales San'ana; Eng^o Washington Pérez Nuñez.

Tradução: Mariana Ricci

Editoração: MURO Produções Gráficas

Revisão: Ellis Pinheiro

Impressão: Gráfica e Editora Cruzado Ltda

Periodicidade: Trimestral – Tiragem: 5.000 exemplares



Nossa capa:

SP-123 – Rodovia Floriano
Rodrigues Pinheiro.
Campos do Jordão, SP.

Foto: Georgina Libório Azevedo

Sumário

2 Editorial

3 SALOMÃO PINTO
O adeus ao ilustre engenheiro

5 Seção de notas

ESPAÇO JURÍDICO

6 Precaução, um princípio inócuo?
Victor Athayde

ARTIGOS TÉCNICOS

8 Avaliação do dano em reforços
de pavimentos
Manuel J. C. Minhoto e Jorge Pais

19 Avaliação da resistência ao dano por
umidade em misturas asfálticas por meio de
métodos adotados no Brasil e na Espanha
Edeildo Almeida Ribeiro, Wellington Lorrain Gaia
Ferreira, Verônica T. F. Castelo Branco, Sandra Aguiar
Soares, Jorge Barbosa Soares e Angel Mateos

30 Utilização de resíduos oleosos em camadas
estabilizadas de bases e sub-bases
de pavimentos rodoviários
Cláudio Batista dos Santos, Adriano Elísio de Figueiredo
Lopes Lucena, André Wesley Barbosa Rodrigues
e John Kennedy Guedes Rodrigues

38 Contribuição ao uso de análise paramétrica
para dimensionamento de pavimentos
flexíveis utilizando valores
estimados de módulo de resiliências
Cláuber J. B. da Costa e Adson Viana Alecrim

CARTAS

50 Cartas dos leitores

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

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

Avaliação do dano em reforços de pavimentos

Manuel J. C. Minhoto

minhoto@ipb.pt

Jorge Pais

jpais@civil.uminho.pt

RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma simulação numérica do comportamento à reflexão de fendas num reforço de pavimento tendo como objectivo a avaliação do dano acumulado, ao longo de um período de tempo, considerando a ação conjunta das ações do tráfego e da temperatura, de modo a concluir sobre o seu comportamento. O estudo baseou-se no estabelecimento de situações tipo de evolução diária da temperatura do ar, para as quais foram determinados os esforços no pavimento em ciclos com periodicidade diária, constantes e repetitivos, ao longo de um determinado período de tempo (mensal ou anual).

A simulação numérica do comportamento do reforço de pavimento conduziu à avaliação dos estados de tensão/deformação no reforço, associados a cada situação de carregamento (tráfego e variações de temperatura) e para dois tipos de materiais betuminosos considerados constituintes do reforço do pavimento: mistura betuminosa con-

vencional e mistura betuminosa com betume modificado com borracha. A avaliação dos estados de tensão/deformação no reforço serviram de base à avaliação do dano horário associado às situações de carregamento, sendo este calculado com base no tráfego efetivamente observado numa seção de estudo, bem como na distribuição anual e mensal de temperatura.

Com base no dano horário foi calculado o dano acumulado para determinados meses do ano e para um ano completo, de modo a concluir sobre o comportamento daqueles dois tipos de misturas betuminosas, quando usadas num reforço de pavimentos, perante condições de carregamento térmico conjugado com carregamento do tráfego.

PALAVRAS-CHAVE

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

1. Introdução

A reabilitação de pavimentos fendilhados através de soluções de reforço do pavimento, baseadas no uso de misturas betuminosas, tem sido uma das principais solu-

ções adotadas pelas administrações rodoviárias. No entanto, verifica-se, com relevante frequência, o aparecimento prematuro de fendilhamento nos reforços de pavimento, resultante da reflexão das fendas existentes no pavimento antigo, degradado, verificando-se, na maioria

dos casos, que a expectativa de tempo de vida dos reforços de pavimentos, dimensionados com base em procedimentos e em modelos atualmente em uso, nem sempre corresponde ao realmente observado (TSCHEGG *et al.*, 2000). Em muitos casos, constata-se que as fendas se propagam através das novas camadas de reforço (Figura 1) particularmente durante os primeiros anos de serviço do reforço.

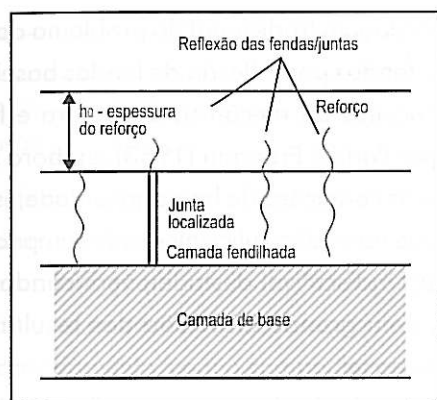


Figura 1 – Propagação do fendilhamento pelo reforço de pavimento

O fenômeno de reflexão das fendas nas camadas de reforço deve-se, sobretudo, à elevada concentração de tensões que se verifica na proximidade da fenda provocando a iniciação e propagação do fendilhamento, por reflexão das fendas. Estes elevados estados de tensão no interior dos reforços de pavimento são o resultado da atuação de determinados mecanismos de degradação que se manifestam através de movimentos diferenciais, horizontais e verticais, dos bordos das fendas existentes na camada do pavimento antigo e que são dependentes dos principais tipos solicitações a que está sujeito, em particular do tráfego e das variações de temperatura (MARTIN-PÉREZ & MOHAMED, 2000). O papel das solicitações na atuação dos mecanismos de degradação é influenciado por outros fatores, tais como: a geometria das camadas, as propriedades dos materiais constituintes das camadas, as características da fundação, as características das fendas e a ligação entre camadas.

Os principais tipos de solicitações suscetíveis de provocar movimentos nos bordos das fendas, produzindo abertura e fecho das fendas e, conseqüentemente,

um potencial de reflexão de fendas (de Bondt, 2000; Colombier, 1997; de BOND *et al.*, 1995) são os seguintes:

- a ação do tráfego;
- a ação das variações de temperatura;
- a ação resultante dos movimentos de expansão/retração do solo de fundação.

A ação do tráfego, considerada a mais gravosa para a reflexão de fendas (MOLENAAR & POTTER, 1997), reflete-se num considerável incremento de tensões, localizado imediatamente acima de uma fenda, como resultado da passagem de uma carga na sua vizinhança. Este incremento no estado de tensão resulta sobretudo do efeito dos deslocamentos relativos dos bordos dessa fenda, designados por atividade de fendas (PAIS, 1999).

As variações de temperatura diárias e sazonais (entre Verão e Inverno) provocam nas camadas betuminosas, de reforço, e nas subjacentes movimentos de retração e de expansão horizontais dos bordos das fendas, produzindo ações de abertura e fecho das fendas, ou seja, uma atividade horizontal das fendas. As variações de temperatura conduzem ainda à variação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas, sobretudo da sua rigidez, refletindo-se no estado de tensão na zona acima da fenda (MINHOTO, 2007).

Os movimentos do solo de fundação estão normalmente associados às variações do seu estado hídrico, o qual provoca alterações volumétricas que conduzem à expansão e à retração da fundação, induzindo, indiretamente, movimentos de abertura e fecho das fendas que interferem nos estados de tensão nas zonas do reforço junto às fendas.

A ação de corte no reforço, resultante da atuação do tráfego, é a principal responsável pela propagação do fendilhamento, embora se possa concluir da importância de tomar em devida consideração o efeito das variações de temperatura no fenômeno da reflexão de fendas. A situação de ocorrência simultânea da ação do tráfego e das ações de variações de temperatura constitui, também, uma situação de carregamento considerada crítica, em termos do fenômeno da reflexão de fendas (CHANG, 1976) (JOSEPH, 1987).

A ocorrência de variações de temperatura ao longo de um determinado intervalo de tempo induz no reforço

de pavimento, concretamente numa zona do reforço localizada acima de uma fenda, um estado contínuo de tensão de longa duração, de valor variável, para além de influenciar na variação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas. A este estado de tensão, sobrepõem-se, com determinada frequência, repetidos estados de tensão, de muito curta duração, resultantes de cada carregamento devido passagem de um eixo, conforme se ilustra na Figura 2.

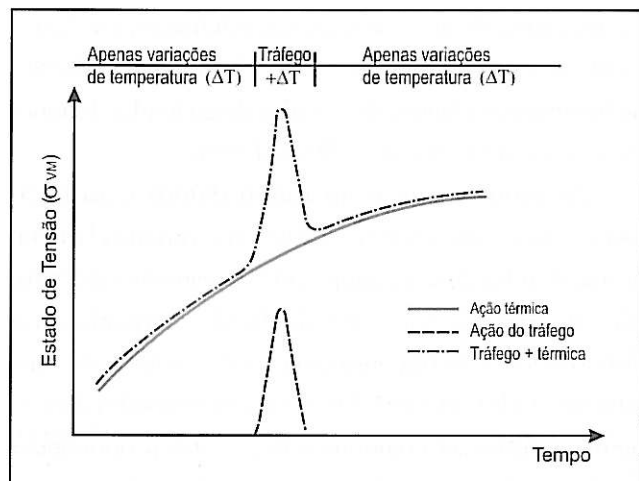


Figura 2 – Evolução do estado de tensão no reforço devido à ação do tráfego e das variações de temperatura

O estado de tensão de origem térmica é induzido no reforço, principalmente nas zonas ativas localizadas acima de uma fenda, através de dois mecanismos, que atuam simultaneamente num pavimento reforçado: i) uma retração térmica restringida da camada de reforço; ii) a indução de tensões na camada de reforço resultante de uma ação repetitiva de abertura e fecho das fendas da camada subjacente ao reforço (MINHOTO, 2007). O primeiro mecanismo conduz a um acréscimo de tensões de tração no reforço, predominantemente horizontais, resultantes da ocorrência de retrações térmicas restringidas associadas às variações de temperatura. O segundo mecanismo está associado a uma ação, repetitiva, de abertura e fecho das fendas, resultante das variações volumétricas dos blocos de pavimento fendilhado.

As variações de temperatura apresentam também uma influência significativa no efeito de transferência de carga entre os bordos de uma fenda constatando-

se que, à medida que a temperatura diminui, a largura da fenda aumenta, reduzindo o efeito de transferência de carga. À medida que o efeito de transferência de carga diminui agravam-se as condições de propagação das fendas pelo reforço. Neste sentido considera-se que a consideração do efeito das variações de temperatura combinada com o efeito do tráfego conduz a uma situação desfavorável em termos de reflexão de fendas.

A abordagem tradicional do problema da propagação das fendas por reflexão de fendas baseia-se no uso de conceitos da mecânica da fratura e foi estabelecida por Paris & Erdogan (1963), embora se reconheça que as condições de homogeneidade, isotropia e linearidade não estão suficientemente cumpridas para a aplicação indiscutível desta lei, verificando-se, geralmente, uma grande dispersão dos resultados obtidos com esta lei.

As metodologias baseadas na utilização tensões/ extensões deviatórias revelam-se pertinentes para a avaliação do fenômeno de reflexão de fendas em reforços de pavimento. No presente trabalho adotou-se a metodologia empírico-mecanicista, que também integra uma abordagem do tipo "banda enfraquecida", desenvolvida por Sousa *et al.* (2002), para avaliação da influência das variações de temperatura na reflexão de fendas em reforços de pavimentos. Trata-se duma metodologia que baseia o seu funcionamento em ensaios experimentais de utilização corrente por parte dos projetistas, como é o caso dos ensaios de fadiga, mas com abordagem teórica similar às abordagens baseadas na mecânica da fratura, usando estados de tensão deviatórios.

O presente estudo baseou-se na realização duma simulação numérica representativa do comportamento à reflexão de fendas do reforço de um pavimento, quando sujeito à ação do tráfego e de variações de temperatura. A simulação baseou-se na utilização da metodologia dos elementos finitos para modelação do comportamento do pavimento tendo em vista a avaliação dos estados de tensão e de extensão associados à ocorrência três situações de carregamento (Figura 3): i) apenas tráfego; ii) tráfego conjugado com as variações de temperatura; iii) apenas variações de temperatura.

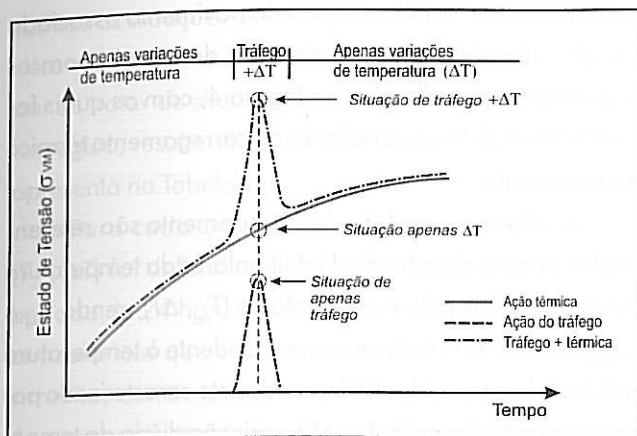


Figura 3 – Situações de carregamento consideradas na simulação numérica

A referida simulação numérica consistiu, por um lado, numa modelação mecânica do pavimento orientada para simulação da ação das variações de temperatura, da qual se destaca a modelação de longa duração do carregamento, com o comportamento mecânico das misturas resultante essencialmente dos efeitos da retração térmica e da componente de relaxação. Por outro lado, foi realizada uma modelação mecânica do pavimento orientada para simulação da ação do tráfego, da qual se destaca a modelação de curta duração do carregamento, ou seja, do comportamento elástico.

A modelação descrita visou, essencialmente, a avaliação dos estados de tensão e de extensão associados à ocorrência das referidas solicitações, a partir dos quais foi avaliada a resistência do reforço do pavimento à reflexão de fendas, através da obtenção da vida previsível, para as diferentes situações de carregamento.

A determinação da vida previsível do reforço, para cada caso de carregamento, foi realizada a partir do uso de leis de fadiga, obtidas em ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos, sob condições de extensão controlada, considerando para tal a extensão de Von Mises, ϵ_{VM} , como parâmetro de controle da reflexão de fendas, de acordo com a metodologia empírico-mecanicista, proposta por Sousa *et al.* (2002).

A partir da avaliação do número de eixos admissíveis, determinado para cada hora do período de análise, e conhecido o número de eixos observados, através das contagens de tráfego para as mesmas horas em análise, foi avaliado o rácio de resistência que se

gasta em cada hora, normalmente designado por dano, com a seguinte expressão:

$$D_{h,e} = \frac{N_{h,e}}{N_{adm,h,e}}$$

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 para as condições da hora h.

2. Descrição do estudo

O estudo envolveu uma simulação numérica de avaliação do dano verificado num reforço de pavimento resultante da ocorrência de variações térmicas no pavimento associadas ao carregamento do tráfego, baseando-se no estabelecimento de situações padrão para as variações da temperatura no reforço do pavimento e correspondentes esforços no pavimento, em ciclos com periodicidade diária, constantes e repetitivos, ao longo de um determinado período de tempo (mensal ou anual).

A simulação numérica do comportamento do reforço de pavimento conduziu à avaliação dos estados de tensão/deformação teóricos no reforço, associados a cada situação de carregamento e para dois tipos de materiais betuminosos para o reforço do pavimento: mistura betuminosa convencional (MCD) e mistura betuminosa com betume modificado com borraça (BMB).

O conhecimento dos estados de tensão e deformação no reforço permitiu realizar uma avaliação do dano horário associado às situações de carregamento, sendo este calculado com base no tráfego efetivamente observado numa seção de estudo bem como na distribuição anual e mensal das solicitações térmicas.

O dano resultante desta análise permitiu calcular o dano acumulado durante determinados meses do ano e ao fim de um ano completo, permitindo assim concluir sobre o comportamento daqueles dois tipos de misturas betuminosas quando usadas num reforço de pavimentos,

perante condições de carregamento de térmico associado ao carregamento do tráfego.

Para a persecução do objetivo proposto, este estudo foi desenvolvido tendo por base as seguintes fases:

- estabelecimento das condições de simulação do tráfego e das variações de temperatura;
- avaliação do estado térmico do pavimento para cada situação de carregamento padrão;
- avaliação do estado de tensão/deformação, com a combinação dos efeitos do tráfego e das variações de temperatura, para cada situação padrão;
- avaliação do dano horário, mensal e anual associados a cada situação de carregamento.

Os dados obtidos do estudo apresentado foram comparados com o mesmo tipo de danos obtidos numa simulação numérica, considerando o carregamento efetivamente observado em um reforço de pavimento ao longo de um ano completo.

3. Condições de simulação

Na primeira fase do estudo procedeu-se ao estabelecimento dos valores dos parâmetros necessários à

racterização do estado térmico do pavimento associado a cada situação de carregamento, de acordo com os procedimentos indicados na Figura 4, com os quais foram estabelecidas as condições de carregamento térmico no pavimento.

As situações padrão de carregamento são referenciadas através da adoção de dois valores da temperatura do ar, definidas pelo par de valores $(T_{ref}, \Delta T)$, sendo T_{ref} a temperatura de referência correspondente à temperatura máxima do ar no ciclo diário, sendo este caracterizado por uma variação sinusoidal, e ΔT a variação diária da temperatura, ficando, com este último valor, implicitamente definida uma temperatura mínima diária do ar.

Os valores adotados para a temperatura de referência do ar, T_{ref} , variam num intervalo compreendido entre 5 °C e 35 °C, com incrementos de 5 °C. O intervalo de valores adotado corresponde a uma gama de temperaturas do ar verificadas no pavimento em estudo. Os valores adotados para as variações de temperatura, ΔT , variaram entre -5 °C e -35 °C, com incrementos de -5 °C, resultando um conjunto de 49 possíveis situações de carregamento. Destas 49 situações excluí-

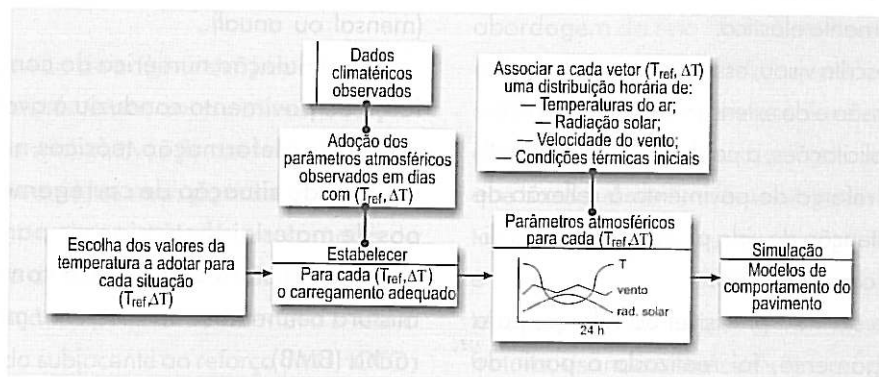


Figura 4. Procedimento para definição dos parâmetros para a simulação numérica

Tabela 1. Conjunto de temperaturas do ar consideradas na simulação (°C)

T_{ref}	ΔT	T_{min}	T_{ref}	ΔT	T_{min}	T_{ref}	ΔT	T_{min}	T_{ref}	ΔT	T_{min}	T_{ref}	ΔT	T_{min}	T_{ref}	ΔT	T_{min}	T_{ref}	ΔT	T_{min}
35	-5	30	30	-5	25	25	-5	20	20	-5	15	15	-5	10	10	-5	5	5	-5	0
	-10	25		-10	20		-10	15		-10	10		-10	5		-10	0			
	-15	20		-15	15		-15	10		-15	5		-15	0						
	-20	15		-20	10		-20	5		-20	0									
	-25	10		-25	5		-25	0												
	-30	5		-30	0															
	-35	0		-35	-5															

ram-se as situações de carregamento térmico que conduzissem a temperaturas mínimas do ar inferiores a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, por se tratar de situações de ocorrência pouco verosímil na região, resultando o conjunto de temperaturas que se apresenta na Tabela 1.

Para cada uma das situações padrão adotadas (T_{ref} , ΔT) foi definida uma distribuição horária para um período de 24 horas (diário) dos principais parâmetros atmosféricos que influenciam o estado térmico do pavimento, concretamente: a evolução da temperatura do ar, a evolução da radiação solar, a velocidade média do vento e a distribuição em profundidade das temperaturas no pavimento para a hora inicial correspondente à hora em que ocorre a máxima temperatura no pavimento (14H00). Estes parâmetros foram estabelecidos através de uma análise exaustiva das distribuições dos mesmos, em dias que apresentaram uma temperatura máxima igual a T_{ref} e uma temperatura mínima igual a $T_{ref} + \Delta T$.

A evolução da radiação solar ao longo do dia foi definida, para cada situação, partindo de uma avaliação da variação da radiação solar diária nos dias que apresentavam como temperaturas máxima e mínima valores correspondentes às das situações de carregamento adotadas. O estado térmico do pavimento, no momento inicial de cada simulação, é definido pela imposição dos valores das temperaturas a várias profundidades do pavimento, tendo os valores sido obtidos pela análise exaustiva das condições iniciais observadas nos dias que apresentam as temperaturas máxima e mínima, coincidentes com as situações de

carregamento adoptadas. Estes parâmetros utilizados para a definição das situações padrão podem ser obtidos em Minhoto (2007).

4. Simulação numérica

O procedimento adotado para a determinação do estado mecânico do pavimento seguiu os passos que se apresentam na Figura 5, envolvendo o uso dos modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos, orientados para a simulação térmica e mecânica do pavimento. Estes modelos envolvem uma componente de avaliação térmica, através dos modelos MDTP e MDTP, e uma componente mecânica, através dos modelos de avaliação do estado de tensão/deformação do pavimento, concretamente o modelo MMTRF de avaliação do estado de tensão/deformação devido ao tráfego e modelo MMTER de avaliação do estado de tensão/deformação devido às variações de temperatura.

Para a obtenção do estado mecânico no pavimento foi indispensável a realização prévia de uma avaliação do estado térmico do mesmo, no sentido deste constituir uma solicitação para a avaliação mecânica do pavimento. Neste sentido realizou-se, em primeiro lugar, a simulação numérica das condições atmosféricas, tendo em vista a obtenção das temperaturas em todo o domínio geométrico do pavimento. Esta simulação numérica foi realizada, para um período diário de cada situação padrão, pelo modelo térmico transiente MDTP, tendo como solicitações os parâmetros estabelecidos anteriormente para cada situação padrão. Este modelo,

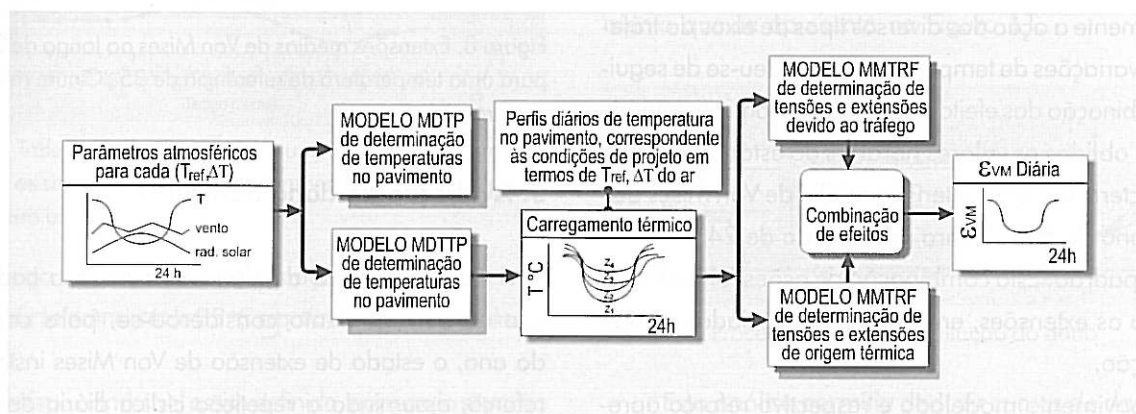


Figura 5. Procedimentos para determinação do estado mecânico do pavimento

baseado na metodologia dos elementos finitos (Figura 6), realiza uma avaliação transiente da evolução das temperaturas no pavimento ao longo do período de 24 horas. As condições iniciais de simulação térmica são obtidas através do modelo MDTP, para todo o domínio geométrico do pavimento, a partir da distribuição discreta das temperaturas iniciais.

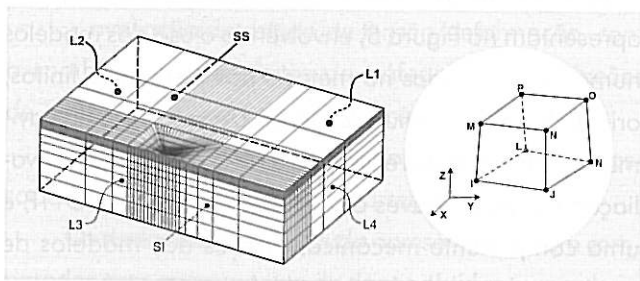


Figura 6. Modelo de elementos finitos utilizado na modelação

O estado térmico do pavimento, obtido para cada situação padrão, constitui uma solicitação para os modelos de base termomecânica, de avaliação do estado de tensão/deformação no reforço. Com base no estado térmico transiente do pavimento, procedeu-se, através da simulação numérica, à avaliação do estado mecânico (tensões e extensões) no reforço associado às variações de temperatura e ao carregamento do tráfego, para cada tipo de mistura betuminosa. Esta avaliação é realizada pelos modelos MMTRF e MMTER, sendo o primeiro orientado para avaliação, em estado estacionário, da ação do tráfego (eixo de 130 kN) e o segundo orientado para a avaliação do efeito transiente das variações de temperatura.

Com base nos estados de tensão/deformação para cada situação padrão e associados a cada tipo de ação, concretamente a ação dos diversos tipos de eixos do tráfego e das variações de temperatura, procedeu-se de seguida à combinação dos efeitos destas ações com a finalidade de serem obtidos os valores horários do estado de extensão caracterizado pela extensão média de Von Mises acima da zona da fenda, para um período de 24 horas da situação padrão. Esta combinação de ações foi realizada somando as extensões, em cada nó, associadas a cada tipo de ação.

O pavimento modelado e respectivo reforço apresentam as espessuras e características mecânicas (mó-

dulo de rigidez para análise linear, características visco-elásticas para análise transiente e características de fadiga) indicadas em Minhoto e Pais (2009).

Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se valores da extensão de Von Mises (ϵ_{VM}) na zona do reforço sobre as fendas para as situações padrão com temperatura de referência de 35 °C, para os dois tipos de materiais considerados e para a combinação de carregamento do tráfego e das variações de temperatura.

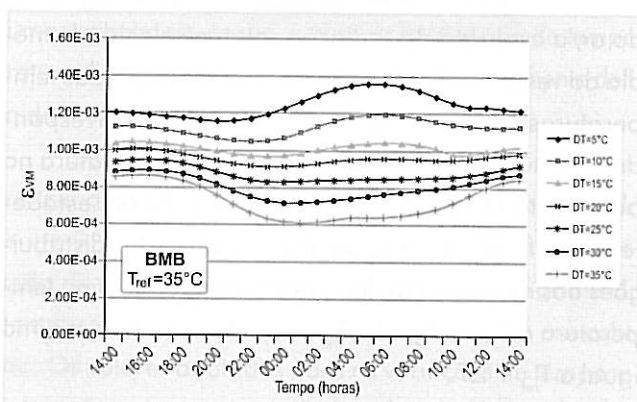


Figura 7. Extensões médias de Von Mises ao longo de 24 horas, para uma temperatura de referência de 35 °C num reforço com mistura com betume modificado com borracha

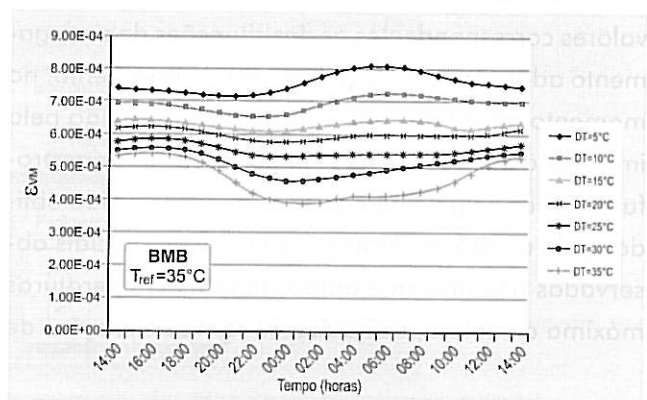


Figura 8. Extensões médias de Von Mises ao longo de 24 horas, para uma temperatura de referência de 35 °C num reforço com mistura convencional

5. Avaliação do dano horário

Para avaliação do dano associado a cada situação de carregamento considerou-se, para cada hora do ano, o estado de extensão de Von Mises instalado no reforço, assumindo a repetição cíclica diária dos valores diários associados a cada situação padrão. O estado

de extensão média de Von Mises, conjugado com as leis de fadiga para a mistura betuminosa convencional e para a mistura betuminosa com BMB, conduz à obtenção do tráfego admissível para os níveis de extensão de Von Mises instalados, para cada tipo de eixo e para cada hora do período diário em análise. Deste modo, para cada situação de carregamento, é avaliado o tráfego horário admissível seguindo o procedimento expresso pelo fluxograma que se apresenta na Figura 9.

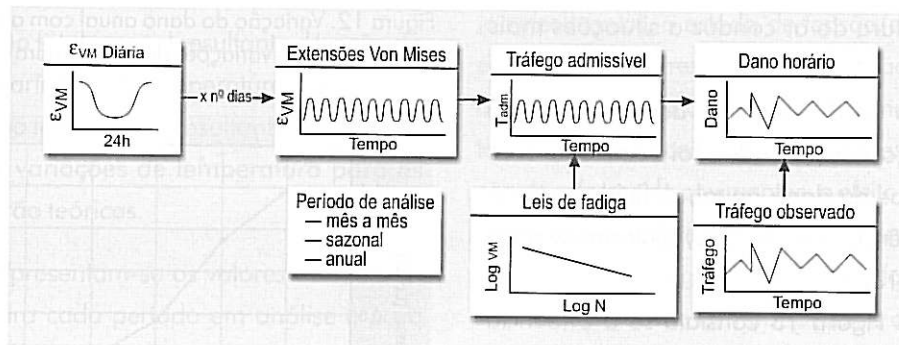


Figura 9. Procedimento para avaliação do dano horário

O tráfego horário admissível, obtido para cada período diário e para cada situação de carregamento, é considerado igual para todos os dias do período (ano ou mês) em estudo, conforme o caso. Como exemplo são apresentados na Figura 10 os valores horários do tráfego admissível,

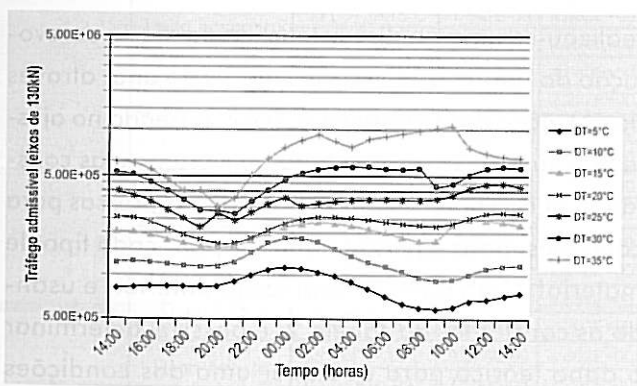


Figura 10. Tráfego horário admissível num reforço em mistura com BMB para as situações padrão com temperatura de referência de 35 °C e para um dia do ano

resultantes da simulação, para as situações padrão cuja temperatura de referência é de 35 °C e para a mistura betuminosa com BMB.

O tráfego admissível assim definido, para cada situação de carregamento, conjugado com o tráfego observado, cor-

respondente à distribuição horária do tráfego horário dos vários tipos de eixos, efetivamente observada, permite avaliar o dano horário associado a cada situação em estudo, o qual, acumulado, permite obter o dano total no período de tempo considerado.

Para a determinação do dano associado a um determinado período de tempo (anual ou mensal) procedeu-se à avaliação do quociente entre o tráfego efetivamente observado a todas as horas de todos os dias do período

considerado e o tráfego horário admissível. No caso da avaliação do dano anual de cada situação padrão, aplica-se o tráfego admissível, associado a essa situação, a todos os dias do ano.

6. Obtenção do dano relativo a um período de análise

A obtenção do dano relativo a um dado período de análise resulta da soma algébrica dos danos horários em todas as horas dos períodos em análise e para cada situação de carregamento térmico, seguindo o procedimento que se apresenta na Figura 11.

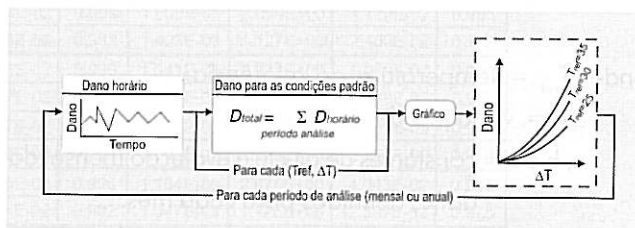


Figura 11. Procedimento para avaliação do dano

Esta análise permitiu deduzir curvas de dano, resultantes da ação conjunta das variações de temperatura e

do tráfego, em que cada curva de dano representa a variação do dano, anual ou mensal, com a variação de temperatura, ΔT , para uma dada temperatura de referência, T_{ref} . Na Figura 12 representam-se as diversas curvas de dano anual obtidas para um reforço em mistura betuminosa com BMB, podendo constatar-se que as curvas de dano anual apresentam um comportamento idêntico e com tendência decrescente do dano à medida que se verifica um decréscimo de temperatura no pavimento. Desta análise pode concluir-se que a diminuição da temperatura do ar conduz a situações mais favoráveis do dano.

A comparação do desempenho dos dois tipos de materiais de reforço considerados foi realizada com base nas suas curvas de dano anual, definidas para a temperatura de referência de $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$, conforme se pode constatar na Figura 13.

Da análise da Figura 13 constata-se a evidência de que as misturas betuminosas com BMB conduzem a danos anuais inferiores às misturas betuminosas convencionais, sendo isto válido para qualquer temperatura de referência.

Neste estudo verificou-se a existência de uma tendência de variação do dano com os parâmetros que caracterizam cada situação de carregamento, ou seja, com a temperatura de referência, T_{ref} , e com a variação de temperatura, ΔT .

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

$$dano = a \times T_{ref}^b \times e^{c \times \Delta T} \quad (1)$$

onde: T_{ref} = temperatura de referência;

ΔT = variação de temperatura;

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

Com base no modelo obtido para evolução do dano função da temperatura do ar e das variações, associados ao carregamento de um eixo de 130 kN,

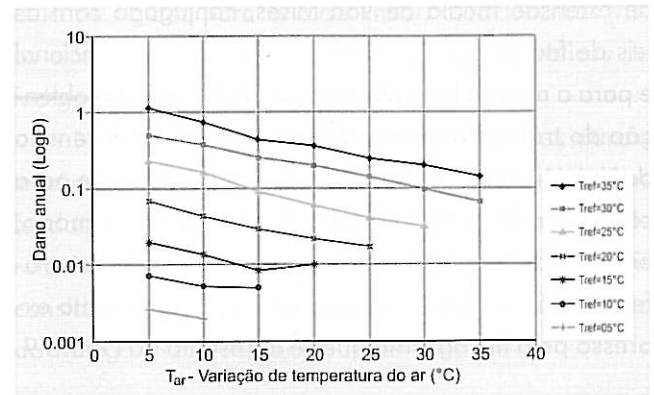


Figura 12. Variação do dano anual com a temperatura de referência e com as variações de temperatura

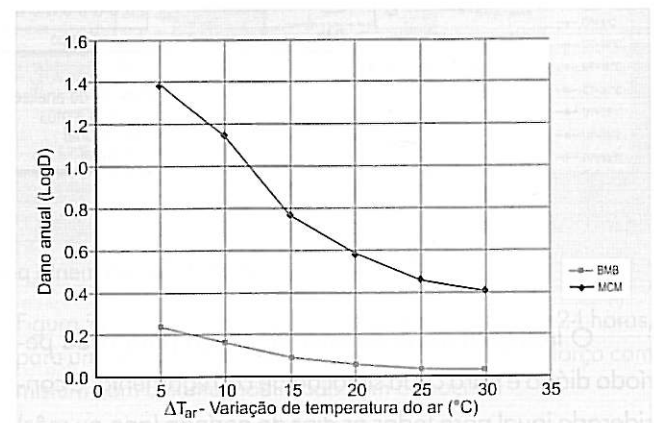


Figura 13. Variação do dano anual com a variação de temperatura, para a temperatura de referência de 25°C e para os dois tipos de mistura

realizou-se uma análise estatística de ajuste da evolução do dano para os vários meses do ano, através da obtenção das constantes a, b e c, baseado no ajuste da Equação 1. Deste estudo obtiveram-se as constantes que se apresentam na Tabela 2, expressas para cada mês, para o período anual e para cada tipo de material. Com base na expressão anterior, e usando as constantes da Tabela 2, é possível determinar o dano teórico para qualquer uma das condições de carregamento consideradas e para cada período de análise.

O dano calculado recorrendo à Equação 1 corresponde ao dano considerando uma temperatura média e a correspondente variação de temperatura para cada mês. No entanto, ao longo de cada mês a temperatura varia de dia para dia e de hora para hora pelo que o dano obtido, ao qual se atribui o nome de dano teórico,

pode diferir do que na realidade o reforço vai estar sujeito, ou seja o dano real.

A diferença entre estes dois danos é expressa pela Equação 2, a qual fornece o *fator de relação de dano* o qual é definido por:

$$r = \frac{D_{mensal}^{real}}{D_{mensal}^{teórico}} \quad (2)$$

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

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

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

Na Tabela 3 apresentam-se os valores do *fator de relação de dano* para cada período em análise e para cada tipo de material considerado, o que permite, utilizando a Equação 1, determinar o dano teórico e posterior-

mente com o fator de relação de dano obter o dano real a que o reforço está sujeito.

7. Conclusões

Do estudo realizado permitiu concluir 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/deformação horário agrava-se como resultado da retração térmica, qualquer que seja o material constituinte da camada de reforço. Dessas conclusões recomenda-se que, para efeito de concepção de reforços de pavimentos, o efeito conjunto do tráfego e das variações de temperatura deva ser considerado como a situação de carregamento mais desfavorável.

Do estudo do comportamento do reforço do pavimento composto pelos dois tipos de materiais adotados no presente trabalho, pode ainda concluir-se que os reforços

Tabela 2. Constantes da Equação 1 para obtenção do dano

		BMB				MCD			
		a	b	c	R ²	a	b	c	R ²
Dano Janeiro	35°C < T _{ref} < 15°C	1.640E-08	4.454E+00	-7.375E-02	0.922	1.467E-05	2.803E+00	-4.071E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.517E-06	2.215E+00	-7.015E-02	0.983	1.028E-03	1.126E+00	-2.460E-02	0.978
Dano Fevereiro	35°C < T _{ref} < 15°C	1.641E-08	4.433E+00	-7.371E-02	0.909	1.423E-05	2.792E+00	-4.074E-02	0.994
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.132E-06	2.215E+00	-6.992E-02	0.983	9.554E-04	1.127E+00	-2.411E-02	0.977
Dano Março	35°C < T _{ref} < 15°C	7.786E-09	4.680E+00	-7.386E-02	0.996	1.214E-05	2.874E+00	-4.067E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.651E-06	2.227E+00	-7.076E-02	0.983	1.098E-03	1.127E+00	-2.521E-02	0.978
Dano Abril	35°C < T _{ref} < 15°C	6.998E-09	4.674E+00	-7.154E-02	0.996	1.133E-05	2.868E+00	-4.008E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	4.989E-06	2.223E+00	-6.550E-02	0.983	1.003E-03	1.124E+00	-2.295E-02	0.978
Dano Maio	35°C < T _{ref} < 15°C	7.679E-09	4.679E+00	-7.430E-02	0.996	1.197E-05	2.870E+00	-4.078E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.745E-06	2.209E+00	-6.954E-02	0.983	1.059E-03	1.127E+00	-2.433E-02	0.978
Dano Junho	35°C < T _{ref} < 15°C	7.864E-09	4.681E+00	-7.464E-02	0.996	1.223E-05	2.873E+00	-4.107E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.800E-06	2.218E+00	-6.993E-02	0.984	1.098E-03	1.126E+00	-2.533E-02	0.978
Dano Julho	35°C < T _{ref} < 15°C	8.129E-09	4.681E+00	-7.417E-02	0.996	1.297E-05	2.870E+00	-4.085E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	6.293E-06	2.203E+00	-7.075E-02	0.982	1.156E-03	1.126E+00	-2.483E-02	0.978
Dano Agosto	35°C < T _{ref} < 15°C	9.878E-09	4.682E+00	-7.464E-02	0.996	1.609E-05	2.869E+00	-4.120E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	7.590E-06	2.207E+00	-7.106E-02	0.982	1.423E-03	1.127E+00	-2.480E-02	0.977
Dano Setembro	35°C < T _{ref} < 15°C	8.655E-09	4.678E+00	-7.363E-02	0.996	1.341E-05	2.875E+00	-4.059E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	6.375E-06	2.215E+00	-6.877E-02	0.984	1.220E-03	1.125E+00	-2.488E-02	0.978
Dano Outubro	35°C < T _{ref} < 15°C	7.878E-09	4.675E+00	-7.347E-02	0.996	1.215E-05	2.873E+00	-4.051E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.548E-06	2.229E+00	-6.887E-02	0.983	1.092E-03	1.125E+00	-2.455E-02	0.978
Dano Novembro	35°C < T _{ref} < 15°C	7.399E-09	4.680E+00	-7.315E-02	0.996	1.154E-05	2.876E+00	-4.043E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.657E-06	2.208E+00	-7.014E-02	0.982	1.047E-03	1.125E+00	-2.397E-02	0.978
Dano Dezembro	35°C < T _{ref} < 15°C	6.803E-09	4.678E+00	-7.262E-02	0.996	1.077E-05	2.874E+00	-4.018E-02	0.995
	15°C < T _{ref} < 5°C	5.005E-06	2.222E+00	-6.961E-02	0.982	9.668E-04	1.125E+00	-2.301E-02	0.977
Dano Anual	35°C < T _{ref} < 15°C	9.321E-08	4.680E+00	-7.368E-02	0.996	1.479E-04	2.871E+00	-4.089E-02	0.998
	15°C < T _{ref} < 5°C	7.086E-05	2.207E+00	-6.962E-02	0.983	1.317E-02	1.124E+00	-2.416E-02	0.978

Tabela 3. Dano real, dano teórico e fator de relação de dano

Período	Temperaturas do ar				Dano-Carregamento real		Dano-Carregamento teórico		fator (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	2.123E-03	8.340E-03	5.304E-04	1.145E-02	4.002E+00	7.283E-01
Fevereiro 04	11.02	10.67	0.36	5.06	4.565E-03	1.738E-02	4.956E-04	1.104E-02	9.211E+00	1.574E+00
Março 04	11.69	9.95	1.73	6.65	1.125E-02	3.615E-02	6.677E-04	1.363E-02	1.686E+01	2.653E+00
Abril 04	15.69	13.13	2.56	9.41	1.462E-02	4.146E-02	1.061E-03	1.800E-02	1.378E+01	2.303E+00
Mai 04	19.68	12.29	7.39	13.68	9.999E-03	1.720E-02	3.492E-03	3.754E-02	2.864E+00	4.582E-01
Junho 04	28.13	15.22	12.91	20.99	1.590E-02	1.299E-02	1.536E-02	9.528E-02	1.035E+00	1.364E-01
Julho 04	27.68	15.17	12.51	20.58	1.807E-02	1.391E-02	1.485E-02	9.614E-02	1.216E+00	1.447E-01
Agosto 04	25.78	11.49	14.29	20.30	1.570E-02	1.169E-02	1.696E-02	1.123E-01	9.257E-01	1.041E-01
Setembro 04	25.16	16.46	8.70	16.62	1.199E-02	1.066E-02	9.203E-03	7.317E-02	1.302E+00	1.457E-01
Outubro 04	16.75	9.12	7.63	11.98	4.263E-03	6.598E-03	2.130E-03	2.757E-02	2.002E+00	2.393E-01
Novembro 04	10.09	9.13	0.97	4.95	1.759E-03	8.147E-03	4.914E-04	1.133E-02	3.580E+00	7.188E-01
Dezembro 04	9.08	9.45	-0.37	3.81	1.884E-03	1.016E-02	3.487E-04	9.312E-03	5.402E+00	1.090E+00
Anual	20.80	13.15	7.65	14.27	1.121E-01	1.947E-01	5.206E-02	5.246E-01	2.154E+00	3.711E-01

constituídos por uma mistura betuminosa com BMB apresentam melhor comportamento que os reforços com misturas betuminosas convencionais, sob o ponto de vista da reflexão de fendas considerando o efeito das variações de temperatura, constatando-se que o reforço constituído por uma mistura betuminosa com BMB apresenta estados de extensão mais favoráveis que os resultantes para um reforço com mistura betuminosa convencional.

Neste trabalho foram desenvolvidas relações entre as condições de carregamento (T_{ref} ; ΔT) e o dano

teórico mensal associado, o que permite estabelecer relações entre os danos real e teórico, através do estabelecimento de um fator de relação de danos. Esta conclusão poderá ser confirmada com a realização de estudos com outras estruturas de pavimento e outros materiais.

Neste contexto conclui-se ainda que havendo uma relação entre os danos real e teórico, esta poderá vir a ser expressa por modelos de previsão para condições de carregamento mais generalizadas.

Referências bibliográficas

- Chang, H. S., Lytton, R. L., et al., 1976. Prediction of Thermal Reflective Cracking in West Texas. Research Report 18-3, study 2-8-73-18. Texas Transportation Institute.
- Colombier, G., 1997. Cracking in pavements: nature and origin of cracks. Vanelstraete, A., Francken, L. (eds.). RILEM report 18, Prevention of reflective cracking in pavements. E & FN Spon. London, UK. pp 1-15.
- de Bondt, A., 2000. Effect of Reinforcement Properties. Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Edited by Abd El Halim, A. O., Taylor, D. A. and El Mohamed, H. H.. RILEM. Ottawa, Ontario, Canada. pp 13-22.
- de Bondt, A., Steenvoorden, M. P., 1995. Reinforced test sections A50 (A6) Friesland. Report 7-95-209-21: Road and Railroad Research Laboratory. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands.
- Joseph, P., 1987. *Low temperature reflection cracking through asphalt overlays*. Ph.D. Dissertation, University of Waterloo.
- Martin-Pérez, B., El Mohamed, H. H., 2000. Determining the potential for reflection of cracks. Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Abd El Halim & Taylor & Mohamed (eds.). RILEM. Ottawa, Ontario, Canada. pp 115-124.
- 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.
- Minhoto, M.J.C., Pais, J.C., "Influência da temperatura no comportamento à reflexão de fendas das misturas betuminosas". Revista Pavimentação, Ano IV, nº 13, Associação Brasileira de Pavimentação, p. 6-13, 2009.
- Molenaar, A. A. A., Potter, J., 1997. Assessment and Evaluation of Reflection Crack Potential. Vanelstraete, A., Francken, L. (eds.). RILEM report 18, Prevention of reflective cracking in pavements. E & FN SPON. London, UK.
- Pais, J.C., 1999. Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Braga, Portugal.
- Paris, P. C., Erdogan, F., 1963. *A critical analysis of crack propagation laws*. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, Series D, 85. Nº3
- 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.
- Tschegg, E. K., Catharin, A., Stanzl-Tschegg, E., 2000. *Healing behaviour of reflective cracks*. Proceedings PRO11. 4th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Research in Practice. Abd El Halim & Taylor & Mohamed (eds.). RILEM. Ottawa, Ontario, Canada. pp 47-56.

Basic guidelines for submission of technical articles and contributions

1. The magazine PAVIMENTAÇÃO is a technical-scientific publication by ABPv. All contributions to the Periodical must be exclusively technical and professionals from the Road, Railroad and Airport Engineering.
2. The magazine may also present special contents, written by its editorial staff and board of directors such as opinions and comments considered relevant to the technical-scientific community.
3. All articles and contributions such as unpublished technical notes may be sent all year long so that they can be published in one of the four annual editions or in the following year, depending on the number of selected contents.
4. All papers, whether scientific or technical, comments and letters forwarded for a future publication will be evaluated by three professionals who are members of the Technical-Scientific Committee of the magazine, and will be chosen according to the profile of their content. The evaluating committee will not have cognizance of the authors or papers before the evaluation, and authors will not be allowed to know the identity of those chosen to evaluate their papers.
5. The experts who evaluate papers receive from ABPv a questionnaire that indicate the items to be evaluated in each contribution/paper sent to magazine PAVIMENTAÇÃO, and they may suggest three options in order to forward them:
 - (I) The paper is accepted for publication;
 - (II) The paper is not accepted for publication and will be sent back to the author;
 - (III) The paper might be accepted, if the author agrees with making some changes which may be suggested by one or more experts.
6. It is up to the Board of Directors to judge all negligent cases and allow the publication of papers and contributions that are not all technical, eventually, due to approached subjects and space availability.
7. The authors will be aware of the evaluation result of any contents sent to magazine PAVIMENTAÇÃO as well as the destination of their documents that may be informed to the authors and they will also be informed of what will happen to their contribution, which could be: immediate publication in the following editions according to the number of papers; no acceptance for publication.
8. The authors who have their papers accepted must allow of contents with no copyrights, since ABPv is a non profit association and the magazine PAVIMENTAÇÃO is preferably addressed to its partners.
9. All contributions to magazine PAVIMENTAÇÃO must be preferably sent over the internet, and they may be written in PDF format. All the original papers must be produced in Microsoft Word. All pictures must be on separated sheets, and at least 300dpi resolution. If it is a digital pictures do not belong to the author, he or she will be responsible for both credits and references and authorization for their publication. For graphics, authors must use symbols instead of colors which can clearly distinguish all relevant information of the figure.
10. Contributions must be of at least 2 pages and 15, at most, in A4 format, Times New Roman, size 12, single spacing. An exceeding number of pages may be accepted in extraordinary cases, depending on the magazine's Editor.
11. Foreign papers should be sent in their native language, and it is up to the author to translate it into Portuguese. Authors are responsible for the proofreading and bibliographic references. Articles must also present an abstract of about 200-300 words and indicate up to 5 keywords.
12. These specifications may suffer some changes at any time, by the magazine's editor and by the Board of Directors of ABPv. All articles or technical contributions must be addressed according to the rules in force.