

Universidade do Minho

[CN-11]

Sousa, J.B., **Pais, J.C.**, Saim, R., Way, G.B.

“Método de dimensionamento de reforços para controlar a reflexão de fendas”

2º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2002, Lisboa, 2002, p. 281-

294

2.º Congresso Rodoviário Português

As vias da segurança

VOLUME II

18-20 Novembro 2002

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

CRP

CENTRO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS

ÍNDICE

VOLUME II

Tema 5

TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO

5.1. TERRAPLENAGENS	3
DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS – COEFICIENTES DE SEGURANÇA A APLICAR NO DIMENSIONAMENTO	5
Margarida Pinho Lopes / Maria de Lurdes Lopes	
MÉTODO DAS PASTILHAS PARA IDENTIFICAÇÃO EXPEDITA DE SOLOS TROPICAIS	17
Rita Moura Fortes / João Virgílio Merighi / Alexandre Zuppolini Neto	
ESTUDO DA APLICABILIDADE DE ESCÓRIAS DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA	29
Tawfik Hadjadji / Rui Godinho / Carlos Dinis de Sousa / Anália Torres	
CORTES DE ESTRADAS MUNICIPAIS EM COIMBRA, NO INVERNO DE 2000/2001, DEVIDO A DESLIZAMENTOS	41
Mário Quinta Ferreira / Teresa Quinta Ferreira	
NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE EM OBRAS GEOTÉCNICAS	53
Licinia Gamito	
AVALIAÇÃO <i>IN SITU</i> DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DE CAMADAS GRANULARES E DE LEITO DE PAVIMENTO COM DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO MANUAL	65
Rui Barros / Tomás Espírito Santo / Eduardo Mira Fernandes	

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DA QUALIDADE SEGUNDO A NORMA NP EN ISO 9001:2000 NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA	77
Alfredo José de Castro Ferrão da Fonseca Marques	
5.2. PAVIMENTOS	89
EMULSÕES TERMO-ADERENTES. EXPERIÊNCIA NA SUA UTILIZAÇÃO	91
Paulo Garrido / Hugo Guimarães	
CONCEPÇÃO DE UMA ESTRUTURA FLEXÍVEL INOVADORA, MEDIANTE A CONJUGAÇÃO DE DOIS PROCESSOS CONSTRUTIVOS NÃO TRADICIO- NAIS	99
Carlos M. Valverde Miranda	
EXPERIENCIA DEL EMPLEO DE LAS BASES DE ALTO MÓDULO EN LA M-501 (MADRID)	109
Juan José Potti	
ACTUACIONES EN LOS FIRMES DENTRO DE LOS CONTRATOS DE CONSER- VACIÓN INTEGRAL. CASO ESPAÑOL	123
Juan José Potti / María Martínez	
A QUALIDADE NAS OBRAS RODOVIÁRIAS – A EXPERIÊNCIA DO DEPARTA- MENTO DE CONSTRUÇÃO DE VIAS, DA DIRECÇÃO MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURAS E SANEAMENTO, DA CÂMARA MUNICIPAL DE LISBOA	135
Paula Candelário / Mavildia Yen / José Fonseca	
METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA DE SERVIÇO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	145
Lucília Faria Aquino / Luís Picado-Santos	
REFORÇO DOS PAVIMENTOS DO AERÓDROMO DE ALVERCA – REDIMENSIO- NAMENTO E REQUALIFICAÇÃO PARA AVIÕES “WIDE-BODY”	159
Carlos Alberto de Moraes Neves Brás / Joaquim José Carvalheira Baptista Veloso	
ESTRUTURAS DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO FLEXÍVEL	171
António Miguel Baptista / Luís Picado-Santos	

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS NA BENEFICIAÇÃO DE ESTRADAS URBANAS Catarina Ferreira	185
CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM TERMOS DO PCN (<i>Pave- ment Classification Number</i>) DOS PAVIMENTOS AERONÁUTICOS DA BASE AÉREA N.º 6 NO MONTIJO	193
Joaquim João da Cruz Salvado / António Maria Afonso Marcos	
COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE MISTURAS BETUMI- NOSAS DE ALTO MÓDULO OBTIDAS SOBRE PROVETES EXTRAÍDOS DO PAVIMENTO E PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO	205
Silvino Dias Capitão / Luís Picado-Santos	
ASPECTOS GERAIS DE RECICLAGEM A FRIO	217
Luís Vieira	
COMPLEXO ANTIFISSURAS GEOTEXTIL IMPREGNADO E AREIA BETUME	223
Luís Vieira	
IMPORTÂNCIA DO COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS GRANULARES NO DIMENSIONAMENTO E NA ECONOMIA DE CONSTRUÇÃO DE PAVI- MENTOS FLEXÍVEIS	233
José Manuel Coelho das Neves / António Gomes Correia	
OBSERVAÇÃO DO FENDILHAMENTO DE PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS	245
Luís Quaresma / António Pinelo	
A OPTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME MODIFI- CADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEUS USADOS	257
Manuel Minhoto / Jorge Pais / Paulo Pereira	
DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS PARA ESTUDO DA ADESIVIDADE NAS MISTURAS BETUMINOSAS	269
Hugi Silva / Jorge Pais / Paulo Pereira	
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS PARA CONTROLAR A REFLEXÃO DE FENDAS	281
Jorge Sousa / Jorge Pais / Rachid Saïm / George Way	

A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RIGIDEZ DAS MISTURAS BETUMINOSAS	295
Jorge Pais / Paulo Pereira	
APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS <i>IN SITU</i> NA BENEFICIAÇÃO DA EN 383 – CANHESTROS/ALJUSTREL	305
Rui Simões / Isabel Paul	
ESTUDO DO FENDILHAMENTO COM ORIGEM NA SUPERFÍCIE	319
Elisabete-Freitas / Paulo Pereira / Luís Picado-Santos	
DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS BETUMINOSAS EM CAMADAS DE DESGASTE – SUA CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL	331
Ana Cristina Freire / Maria de Lurdes Antunes / Luís Picado-Santos	
TERMINAL DE CONTENTORES DE SINES – PAVIMENTO RÍGIDO DE BETÃO DE CIMENTO	347
Pedro Serpa dos Santos / Paulo Aleixo Silva / Carlos Suzana	
CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA APLICADA NO IC1	363
Maria de Lurdes Antunes / Maria Isabel Eusébio / Margarida Sá da Costa / Pedro Domingos / Helena Lima	
APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIIS NA CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS	379
Simona Fontul / Maria de Lurdes Antunes / João Marcelino	
LIPOR II. UMA PEDREIRA NA REGIÃO DO PORTO?	393
Luís Vaz Nicolau / Ana Maria Bastos / M. Lurdes Lopes / Joaquim Figueiras	
PAVIMENTOS DE BETÃO EM ESPAÇOS URBANOS: FUNCIONALIDADE, DURABILIDADE E A CONTRIBUIÇÃO PARA UMA REQUALIFICAÇÃO AMBIENTAL	409
Ângela Nunes	
APLICAÇÃO DE CIMENTO EM PAVIMENTOS	419
Jorge Nobre Santos	
MEZCLAS BITUMINOSAS REFORZADAS CON FIBRAS ACRILICAS	435
Luis Puncernau García / Ludwig Bullinger / David González Amago	

5.3. DRENAGEM	445
ESTIMATIVA DA PERMEABILIDADE DE MATERIAIS GRANULARES EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE VAZIOS	447
Luiz Roberto Cavicchia	
UTILIZAÇÃO DE DESCARREGADORES EM DEGRAUS NA DRENAGEM TRANSVERSAL RODOVIÁRIA	459
Manuel Luís Lorena	

Tema 6

ESTRUTURAS

QUALIFICAÇÃO DOS AGENTES E METODOLOGIAS DE INSPECÇÃO E ENSAIO DE PONTES E TÚNEIS	469
Carlós Mesquita / Vítor Cóias e Silva	
REABILITAÇÃO E REFORÇO DA PONTE DE ANGEJA SOBRE O RIO VOUGA ...	481
Tiago Mendonça / Vítor Brito	
IMPERMEABILIZAÇÃO DE TABULEIROS DE PONTES DE BETÃO COM EMUL- SÃO ANIÓNICA DE BETUME MODIFICADO E GEOTÊXTIL	493
Luis Vieira	
REABILITAÇÃO DA PONTE SARMENTO RODRIGUES SOBRE O RIO DOURO EM BARCA D'ALVA	501
Duarte Luís Rio Seco Silva Nobre / Manuel Miguel Jorge	
FERRAMENTA DE APOIO AO DIAGNÓSTICO DE PONTES E VIADUTOS DE BETÃO	515
V. Cóias e Silva / Pedro Lança	
GESTÃO DA QUALIDADE NAS TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA A REABI- LITAÇÃO DE OBRAS DE ARTE DE BETÃO	525
V. Cóias e Silva	
APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DESLIZE DE QUADROS DE BETÃO NA IMPLANTAÇÃO DE PIs EM OBRAS DE REABILITAÇÃO RODOVIÁRIA E FERROVIÁRIA	537
Eduardo Pimentel / Isabel Paul	

<i>Índice</i>	XII
VIADUTO DO PERDIGÃO	549
Victor Barata / Vasco Amaral	
MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS	559
Joaquim A. Figueiras / Carlos Félix	

Tema 7

SEGURANÇA NO TRABALHO, NA CONSTRUÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DA SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO DA CONSTRUÇÃO NO ICOR	573
Luís Gonelha	
O SISTEMA DE GESTÃO DE SEGURANÇA DOS ACE's NORACE, VIANOR, LUSITÂNEA E GRANDE PORTO	597
José Eduardo Marçal Ruivo da Silva / Luís Fontes Machado	
SINALIZAÇÃO RODOVIÁRIA. SUA IMPORTÂNCIA NA ECONOMIA NACIONAL	607
Jorge Aguiar	

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS PARA CONTROLAR A REFLEXÃO DE FENDAS

JORGE SOUSA

Presidente, CONSULPAV

JORGE PAIS

Professor Auxiliar, Universidade do Minho

RACHID SAÏM

Director Técnico, CONSULPAV

GEORGE WAY

ADOT, USA

RESUMO

Esta trabalho descreve um novo método empírico-mecanicista para o dimensionamento de reforços de pavimentos de modo a controlar um dos mais predominantes processos de ruína de pavimentos, a reflexão de fendas. Tanto as misturas convencionais como as misturas descontínuas com betume borracha foram estudadas, tanto em campo como em laboratório, para o desenvolvimento dos modelos mecanicistas e estatísticos.

Os modelos propostos tiveram por base análises extensas com malhas de elementos finitos desenvolvidas para simular o fenómeno de propagação de fendas em campo. Muitas secções de teste especialmente no Arizona foram estudadas durante esta investigação. O programa de cálculo distribuído numa folha de EXCEL pode ser directamente obtido através da Rubber Pavement Association, Arizona Department of Transportation ou CONSULPAV.

1. INTRODUÇÃO

A Rubber Pavement Association (RPA) contratou a CONSULAPV em 1999 para desenvolver um método de dimensionamento para controlar a reflexão de fendas. Este artigo é uma versão condensada do relatório de 8 capítulos e

200 páginas intitulado "Development of a Mechanistic Overlay Design Method Based on Reflective Cracking Concepts" [1].

A Consulpav desenvolveu esta investigação em cooperação e coordenação com a Universidade do Minho e o Arizona Department of Transportation (ADOT). A Universidade do Minho envolveu-se no projecto visto ter desenvolvido recentemente investigação no domínio da reflexão de fendas. O ADOT está interessado no projecto porque usa intensivamente o betume borracha como uma estratégia de reabilitação para reduzir a reflexão de fendas [2, 3, 4, 5].

A investigação inicialmente abordou a adopção de modelos de elementos finitos. Esta opção foi tomada dado que este método permite ser sensível aos estados de tensão e extensão que existem perto dos bordos da fenda quando da passagem de veículos sobre uma fenda (ou perto dela).

Para calibrar o modelo foram feitas medições com o Crack Activity Meter (CAM) e o Falling Weight Deflectometer (FWD) em Portugal, Arizona e na Califórnia, sendo na sua maioria conduzidas no Arizona. Estes resultados não só permitiram fazer a calibração do modelo como também demonstraram que os resultados dos deslocamentos medidos pelo CAM são idênticos aos fornecidos pelos sensores do FWD.

A fase seguinte da investigação envolveu a execução de ensaios laboratoriais para simular a actividade das fendas e medir os deslocamentos e tensões em provetes laboratoriais. Dois tipos de misturas, tipicamente utilizadas, foram fabricadas com granito Portugueses de boa qualidade e testadas em Portugal.

A mistura convencional tinha uma granulometria densa similar à utilizada no Arizona e Califórnia designada por HMA-DG. Cinco por cento de um betume PG70-10 foi adicionado à mistura e compactada com cilindro de rolo a várias porosidades. A segunda mistura continha oito por cento de betume modificado com borracha reciclada de pneus (BMB) e tinha uma granulometria descontínua idêntica à utilizada no Arizona e Califórnia.

O BMB consistia num betume com 80% de PG64-16 (penetração 35/50) e com 20% de borracha reciclada de pneus. Esta duas misturas foram a base dos materiais utilizados no método de dimensionamento de reflexão de fendas.

Carotes e vigas foram tiradas das lajes produzidas pelo cilindro compactador e testadas em laboratório por vários métodos. Os resultados indicam que o ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos permite obter parâmetros suficientes que podem ser utilizados nos modelos desenvolvidos.

Com esta informação é agora possível determinar quais os parâmetros que melhor se ajustam aos modelos estatísticos e de elementos finitos desenvol-

vidos para simular a acção do tráfego pesado. O modelo prevê o número de eixos padrão equivalentes necessários para que uma fenda se propague através da camada de reforço.

Para converter esta ferramenta mecanicista-estatística num sistema prático de dimensionamento de pavimentos foi necessário fazer um investigação extensa com dados de campo e materiais constituintes das camadas de muitos pavimentos. Assim, o número estimado de tráfego que causa a reflexão de fendas foi calculado a partir da espessura e módulos das camadas de vários tipos de pavimentos. Foi feita a comparação entre os que foram realmente observados e os estimados a partir do modelo.

Novas relações e conceitos são introduzidos neste modelo e, entre outros, indica-se que desde que a relação entre o estimado e observado seja inferior a 1 não existe fendilhamento. Se a relação for superior a um o fendilhamento é observado com diferentes níveis de intensidade. Factores de ajustamento para o envelhecimento e temperatura são também conceitos novos apresentados neste modelo.

O produto final desta investigação é uma folha de EXCEL onde o projectista de pavimentos introduz os dados de fendilhamento desejado ao fim da vida de projecto, a espessura e módulos das camadas do pavimento e temperaturas relevantes in-situ. O módulo das camadas existentes pode ser medido através de ensaios de FWD e retro-análise ou estimado desde que sejam estimativas razoavelmente correctas. As curvas que se obtêm, uma para material convencional com betume PG70-10 e outra para o BMB em mistura descontínua, consistem na relação entre a espessura de reforço função do tráfego esperado.

Até ao momento o modelo aplica-se para este dois tipos de misturas para condições climáticas semelhantes aquelas que deram origem ao modelo. Com investigação adicional, outras tipo de materiais e outras zonas climáticas poderiam ser estudadas desde que existam dados históricos de comportamento do pavimento.

2. MODELAÇÃO DA ACCÃO DAS FENDAS

O software SAP2000 na sua versão 3D foi utilizado recorrendo-se a uma modelação elástica linear. As malhas de elementos finitos foram criadas de modo a simular tão de perto quanto possível o fenómeno em campo. Milhares de modelos foram executados e com base em todos os resultados um modelo

estatístico foi criado para simplificar a utilização. As correlações entre o modelo estatístico e os dados obtidos pelo elementos finitos foram a sempre acima de 98%.

A influência das características do pavimento no estado de tensão e extensão no bordo da fenda foram caracterizadas pelas extensões de Von Mises. Esta extensão pode ser expressa pela Equação 1:

$$\epsilon_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}((\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2)} \quad (1)$$

sendo:

- ϵ_{VM} = Extensão de "Von Mises"
- $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ = Extensões principais.

Dos ensaios de fadiga em flexão em quarto pontos obtém que a , tem a seguinte definição:

$$\epsilon_{VM} = \epsilon_1 (1 + v) \quad (2)$$

sendo:

v = coeficiente de Poisson

Deste modo, o modelo estatístico que calcula ϵ_{VM} função das características do pavimento é dado por:

$$\epsilon_{VM} (1 \times 10^{-6}) = a * [Overlay\ thickness\ (m)]^b \quad (3)$$

$$a = \prod_{i=1}^6 [a_{1i} * \ln(X_i) + a_{2i}] \quad (4)$$

$$b = \prod_{i=1}^6 [b_{1i} * \ln(X_i) + b_{2i}] \quad (5)$$

sendo:

a_{ij} e b_{ij} coeficientes dados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes estatísticos para o modelo ϵ_{VM} (Equação 3, 4 e 5) [R2 = 0.98]

i	X_i	a_{1i}	a_{2i}	b_{1i}	b_{2i}
1	Espessura camadas fendilhadas(m)	-1.038E-04	-1.446E-01	7.169E-03	1.314E-01
2	Espessura camadas granulares (m)	2.777E-01	-4.022E+00	9.773E-05	-6.368E-01
3	Módulo do reforço (MPa)	-1.173E+00	1.212E+01	-4.946E-01	7.069E+00
4	Módulo camadas fundilhadas (MPa)	1.281E+00	5.070E-01	3.923E-02	2.641E+00
5	Módulo camadas granulares (MPa)	-5.160E-01	6.964E+00	3.265E-02	-1.287E+00
6	Módulo fundação (MPa)	-1.775E-01	2.385E+00	1.875E-03	-8.167E-01

3. ENSAIOS LABORATORIAIS

A compactação dos provetes foi feita de acordo com o método (AASHTO PP3-94: Standard Practice for Preparing HMA Specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor). As vigas foram cortadas com as seguintes dimensões: 380 x 50 x 63 mm. Os ensaios de fadiga foram executados de acordo com o método AASHTO TP 8-94 (Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted HMA Subjected to Repeated Flexural Bending) a 20°C e 10 Hz. Um sumário dos resultados pode ser visto na Figura 1 onde se verifica que a vida à fadiga em controlo de deslocamento das misturas com BMB é cerca de 10 a 40 vezes superior à vida das misturas com betumes convencionais.

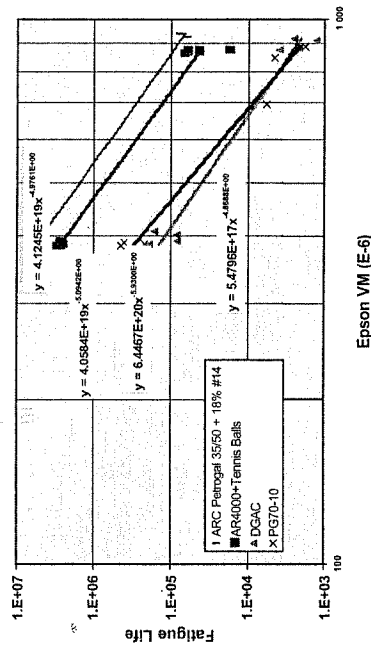


Figura 1 – Vida à fadiga de diferentes misturas função do ϵ_{VM}

4. DADOS DE CAMPO E DE COMPORTAMENTO PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO DE REFLEXÃO DE FENDAS

Um modelo empírico-mecanicista como o que aqui é apresentado requer que as previsões de comportamento sejam calibradas e ajustadas com base em observações reais de comportamento de vários pavimentos. Isto é um processo que requer a existência de uma base de dados muito completa e extensa (ao longo de vários anos). Para este trabalho, as base de dados do desempenho de todos os pavimentos do ADOT foi posta a disposição deste projecto.

Nesta base de dados, a percentagem de fendilhamento refere-se ao método utilizado pelo ADOT para expressar a quantidade e a área de fendilhamento que foi desenvolvida no início da década de 70 [2]. A percentagem de fendilhamento foi desenvolvida em unidades Inglesas uma vez que teve por base a área padrão definida pelo AASHTO Road Test no início da década de 60. A área padrão por definição da AASHTO é de 93,6 metros quadrados (1000 pés quadrados) que representa a largura de 3,7 m (12 pés) por 25,3 m (83 pés) de comprimento. Pelo método do Arizona 1% de fendilhamento é igual a 6,1 metros lineares (200 pés lineares) dentro da área padrão e 100% são 610 m de fendilhamento dentro da área padrão. De maneira idêntica, 10% são 61 metros lineares (2000 pés lineares) de fendilhamento dentro da área padrão. O ADOT tem vindo a usar esta metodologia para medir a percentagem de fendilhamento desde 1972. Os valores observados tem variado entre 0% (sem fendas) até um máximo de 95%. Estes valores foram usados como inputs para o desenvolvimento do modelo.

O ADOT forneceu todos os dados para os modelos de calibração a partir de 30 secções particularmente bem documentadas e dispersas através de todo o Estado do Arizona que incluíram fendilhamento ao longo dos anos, tráfego, módulos e espessuras das camadas, e propriedades dos materiais utilizados, granulometria, tipo e teor de betume, a evolução do fendilhamento antes e de depois do reforço, NEEPs anuais, temperaturas e valores de grau PG recomendados para a região.

5. FACTORES DE AJUSTAMENTO

O processo de calibração do modelo foi executado por um processo iterativo demasiado complexo e extenso para ser explicado neste artigo. De um modo geral envolveu o desenvolvimento de um factor de ajustamento para o envelhecimento (AAF), um factor de ajustamento para a temperatura (TAF) e um factor de ajustamento de campo.

5.1. Factor de Ajustamento do Envelhecimento (AAF)

Este factor foi introduzido para simular o efeito do envelhecimento de uma camada de desgaste função da temperatura máxima do ar. O envelhecimento tem um papel muito importante na durabilidade de um camada betuminosa

tanto mais que com o tempo ela aumenta a sua rigidez. A Figura 2 apresenta a relação encontrada para o AAF função da temperatura, determinada tanto para misturas AR-HMA-GG como para misturas HMA-DG.

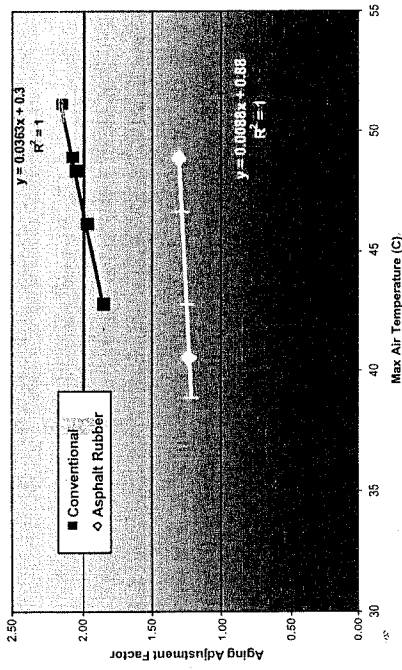


Figura 2 – Determinação dos factores de ajustamento de temperatura para misturas convencionais e com borracha

Com base nestes dados o AAF pode ser expresso por:

$$AAF = 0.0449 * T(\text{max air}) - 0.2435 \quad (\text{for Conventional al PG70-10 binders}) \quad (6)$$

$$AAF = 0.0088 * T(\text{max air}) + 0.7296 \quad (\text{for Asphalt Rubber binders}) \quad (7)$$

5.2. Factor de Ajustamento da Temperatura (TAF)

A reflexão de fendas ocorre predominantemente quando o pavimento se encontra a baixas temperaturas. O verdadeiro mecanismo é muito complexo e vários factores são importantes:

- Extensões causadas pelas cargas quando o veículo passa sobre ou perto das fendas;
- À medida que a temperatura decresce durante a sua variação diária esta pode chegar a atingir variações de 20 a 25°C. Estas variações podem causar tensões nas camadas de reforços e são particularmente importantes na zona da fenda. São uma função da ductilidade e fluência do material. No limite estas tensões por si mesmas podem causar a fractura térmica;

- A combinação destes dois factores pode levar a rotura do material;
- O grau PG dos betumes tem também uma grande influência no estado de tensão. Por exemplo especula-se que se numa determinada região requer um grau PG XX-10 mas se na pratica se usar um grau PG XX-32, uma camada de reforço com este material teria menores probabilidades de reflectir as fendas.

É possível modelar todos estas interacções mas estes esforços estavam fora do âmbito do projecto. No entanto procurou incluir-se estas combinações de acções através da introdução dos factores apresentados. Por exemplo muitas das combinações de acções de temperatura estão englobadas neste factor TAF.

Os ajustamentos destinam-se a majorar o valor previsto de dado pelo modelo relacionado com a carga, de modo a captar também os efeitos da temperatura. Usando os dados fornecidos pelo ADOT para cada uma das secções, os modelos para as misturas HMA-DG e AR-HMA-GG, foram calibrados tal como mostra a Figura 3. A temperatura de reflexão de fendas (RCT) foi arbitrariamente definida como a média entre a mínima temperatura do ar e a temperatura média mensal.

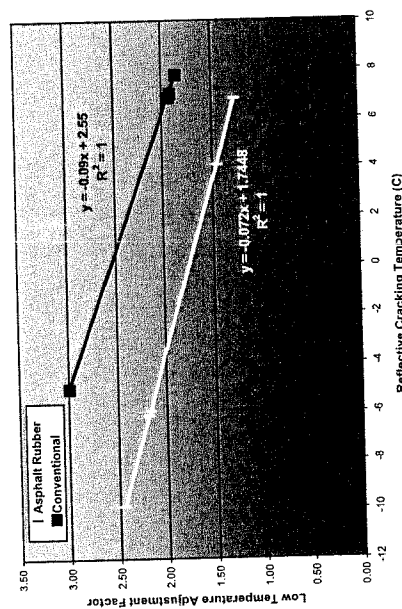


Figura 3 – Desenvolvimento dos factores de ajustamento de temperatura para misturas com betume borracha e convencionais

É interessante notar que os efeitos negativos das baixas temperaturas, ou seja quanto mais baixas são as temperaturas maior e o valor multiplicativo das extensões. É também interessante notar que estes valores são significativamente maiores para as misturas convencionais.

Melhoramentos na determinação deste valor podem estar relacionados com o grau PG das misturas e dos betumes utilizados. No entanto, com base nos dados actuais, recomendam-se as seguintes relações:

$$TAF = -0.092 * RCT + 2.558 \text{ (para betumes convencionais)} \quad (8)$$

$$TAF = -0.072 * RCT + 1.745 \text{ (para betume borracha)} \quad (9)$$

sendo:

$$RCT = T \text{ (min ar)} + 0.5 * [T \text{ (média mensal do ar)} - T \text{ (min ar)}] \quad (10)$$

5.3. Factor de Ajustamento de Campo (FAF)

O factor de ajustamento de campo foi introduzido para relacionar as previsões dadas pelo modelo e as observações feitas *in situ*. Este valor foi determinado dentro do mesmo âmbito dos outros factores.

Só se devê esperar fendilhamento quando o FAF é maior que 1. Para valores de FAF menores que 1 o fendilhamento não deveria ser encontrado. Se assim não fosse o modelo estaria incorrecto.

Assim foi demonstrado que a relação entre a percentagem de fendilhamento PC e o FAF, para valores em que o PC é maior que 1, é dado pela Equação 11, como se verifica pela Figura 4.

$$FAF = e^{0.2303 * PC} \quad (11)$$

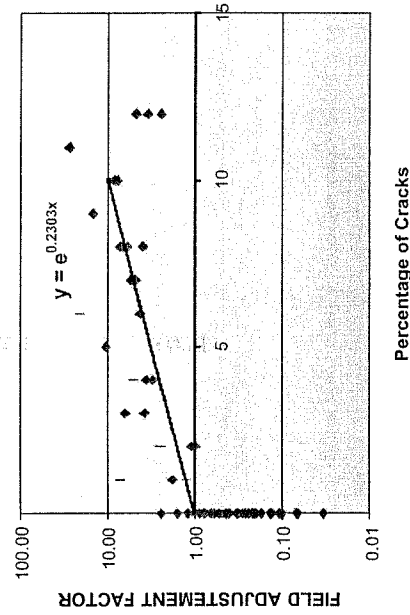


Figura 4 – Desenvolvimento dos factores de ajustamento de campo para misturas com betume borracha e convencionais

A determinação dos três factores AAF, TAF e FAF foi executada simultaneamente, iterativamente e interactivamente até que os resultados fossem obtidos com um elevado grau de precisão. Quando estes valores foram obtidos calculou-se a inclinação e abcissa das rectas relacionadas com o AAF e o TAF de modo a que se minimizasse os valores do R^2 para pavimentos em que o nível de fendilhamento se situava entre 1 e 10%.

A Figura 5 mostra a relação entre o número equivalente de eixos-padrão (NEEP) previsto pelo modelo e medido em campo para o mesmo o grau de fendilhamento medido em campo. Pode observar-se que na sua grande maioria a previsão de todas as secções se encontra muito perto das observadas. O R^2 desta relação atinge os 80%. Os valores que conduzem a resultados fora da tendência geral correspondem a um agregado particularmente invulgar, escórias de alto forno.

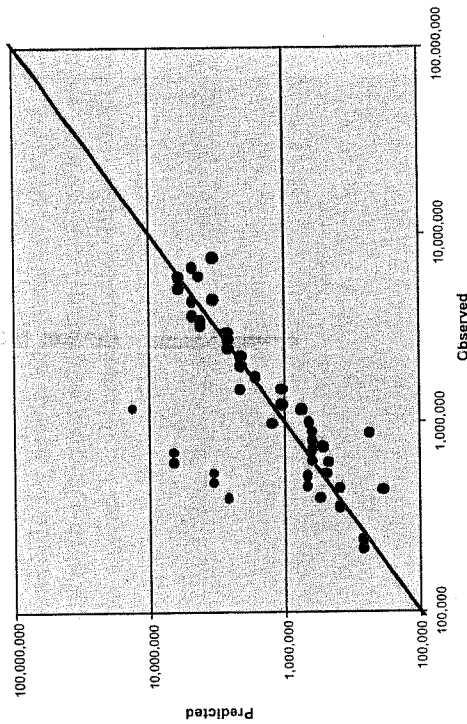


Figura 5 – Comparação entre os valores previstos e observados do número de eixos equivalentes até um nível de fendilhamento. (Estas comparações incluem dados de pavimentos com betume borracha e convencionais)

Tendo em consideração todos os dados pode agora compreende-se melhor como as relações entre a Máxima Temperatura do Ar e o Factor de Ajustamento do Envelhecimento e também as relações entre a Temperatura de Reflexão de Fendas e o Factor de Ajustamento da Temperatura foram desenvolvidas e ajustadas tal como se apresentam nas Figuras 2 e 3. Isto realmente confirma que

essas relações existem e que esses factores têm uma grande importância no fenómeno da reflexão de fendas. Na sua essência o fenómeno de reflexão de fendas depende do nível das tensões aplicadas pelas cargas junto ao bordo das fendas, do envelhecimento da mistura e das tensões causadas pelas baixas temperaturas ou pela queda rápida da temperatura.

6. PROPOSTA DO MÉTODO DE CONTROLO DA REFLEXÃO DE FENDAS

Apresenta-se aqui uma metodologia para o dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis em que se procura minimizar o risco de aparecimento prematuro de fendilhamento. O método consiste em 7 etapas que se apresentam abaixo. Até agora o modelo só foi calibrado para duas misturas: uma convencional com betumes PG70-10 e outra descontínua com betumes modificados com betume borracha. O BMB tem que ser produzido por via húmida e conter 18 a 22% de borracha.

1. Determinação do Módulo e Espessuras das Camadas do Pavimento

Os módulos das camadas existentes podem ser obtidos por retro-análise tendo como base ensaios de FWD. Os módulos devem ser representativos das secções mais danificadas. Deste modo as deflexões correspondentes ao percentil 90 ou 95% devem ser seleccionadas. As carotes devem ser obtidas nas secções representativas do percentil 90 ou 95% para determinação de espessuras das camadas.

2. Determinação das Temperaturas Representativas no local

As temperaturas máximas e mínimas do ar devem ser determinadas com o grau de fiabilidade desejado para o local onde o pavimento vai ser reforçado. É também necessário calcular a temperatura média mensal do ar de acordo com o método da Shell.

3. Selecção da Percentagem de Fendilhamento de projecto

A selecção da percentagem de fendilhamento deve ser feita de acordo com o que se apresentou neste artigo e estar dentro da política e critérios definidos pela agência viária. No ADOT geralmente usa-se 5% de fendilhamento como valor de projecto.

4. Determinação dos Factores de Ajustamento

Vários factores de ajustamento devem ser calculados para o local onde o pavimento vai ser reforçado.

O factor de Ajustamento de Envelhecimento (AAF) deve ser determinado a partir da Equação 6 ou 7 função do material que vai ser utilizado. Estas funções aplicam-se para locais em que $\sigma_{T \max}$ se situa entre 35°C and 50°C.

O factor de ajustamento da Temperatura é determinado através das Equações 8 ou 9 para misturas convencionais ou com BMB (vai húmida). Este método foi calibrado para temperaturas em que a Temperatura de Reflexão de Fendas se situa entre -10°C and +10°C.

O factor de ajustamento de campo calcula-se de acordo com a Equação 11 onde o PC é a percentagem de fendilhamento entre 1 e 10%.

5. Selecção do Módulo do Material de Reforço

Neste momento dois tipos de materiais podem ser utilizados no modelo: Convencional HMA-DG com betumes PG70-10 ou AR-HMA-GG com BMB com 19 a 20% de borracha reciclada de pneus. Para estes materiais o módulo e a vida à fadiga foram obtidas através de ensaios de flexão tal como apresentados na Figura 1.

6. Determinação da Extensão de Projecto, ϵ_{VM}

O módulo do reforço seleccionado no ponto 5 tem que ser multiplicado pelo Factor de Ajustamento de Envelhecimento. Com este novo módulo e as espessuras das camadas, o valor do ϵ_{VM} é calculado utilizando as Equações 3, 4 e 5.

O valor ϵ_{VM} obtido desta maneira deve ser multiplicado por 86/132 (para converter ϵ_{VM} de eixos de 130-kN para eixos de 80-kN se for caso disso), e também pelo Factor de Ajustamento de Temperatura. O valor assim obtido é o valor de ϵ_{VM} de projecto.

7. Determinação dos NEEP de Projecto

Utilizando as equações de fadiga que se apresentaram na Figura 1, determina-se o número de NEEPS que deverão existir até ao início do fendilhamento.

$$ESALS = 4.1245E19 * [\epsilon_{VM} (1 \times 10^{-6})]^{-4.9761} \quad (12)$$

para misturas com BMB com granulometrias descontinuas.

$$ESALS = 6.4467E19 * [\epsilon_{VM} (1 \times 10^{-6})]^{-5.93} \quad (13)$$

para misturas convencionais de granulometria densa e com betumes PG70-10.

Seguidamente multiplicam-se os NEEPS assim obtidos pelo factor FAF calculado no passo 4 de modo a ter em linha de conta o grau de fendilhamento aceitável.

Uma folha de EXCEL foi programada (ver Figura 6) com todas as fórmulas incluídas neste artigo. O input é introduzido na coluna C e o gráfico automaticamente se regenera para as condições do pavimento e das temperaturas do local. Tendo em consideração o tráfego desejado pode-se obter do gráfico da espessura de reforço mínima para controlar o grau de fendilhamento. Geralmente uma camada de reforço com BMB terá cerca de metade da espessura de uma camada de reforço com misturas convencionais.

7. CONCLUSÕES

Este projecto de investigação integrou ensaios laboratoriais, observações e medições de campo e modelação de elementos finitos e análise estatística para o desenvolvimento de um método empírico mecanicista destinado a dimensionar o reforço de camadas betuminosas para resistir a reflexão de fendas.

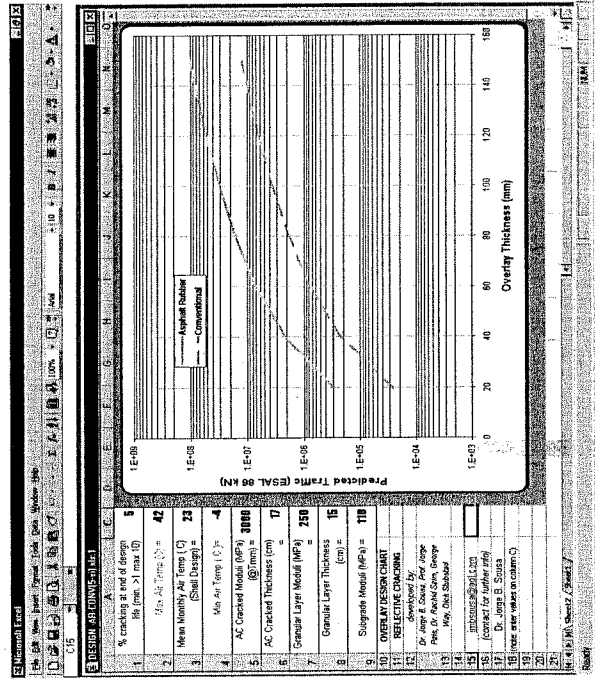


Figura 6 — Exemplo do modelo de reflexão de fendas implementado numa folha de EXCEL

Este método foi desenvolvido para misturas densas com betumes convencionais e descontínuas com betume borracha e adapta-se para climas idênticos aos do Arizona, Sul da Califórnia e provavelmente Portugal. Este tipo de modelo adapta-se a qualquer tipo de mistura desde que as propriedades sejam conhecidas, se conheçam as características locais e de tráfego e que a evolução do fendilhamento faça parte da base de dados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a cooperação dada pela Rubber Pavements Association, pelo Arizona Department of Transportation, pelo California Department of Transportation, e pela Junta Autónoma de Estradas. Reconhecem-se também as contribuições dadas pelo Dr. Shakir Shatnawi da Caltrans e por Ali Zareh do ADOT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SOUSA, J. B.; PAIS, J. C.; SAÏM, R.; WAY, G. B. & STUBSTAD, R. N. – “Development of a Mechanistic Overlay Design Method Based on Reflective Cracking Concepts”, Rubber Pavements Association/ADOT, August, 2001.
- [2] WAY, G. B. – “Prevention of Reflection Cracking Minnetonka-East”, ADOT, Report Number 1979GWI, August 1979.
- [3] SCOFIELD, L. A. – “History, Development, and Performance of Asphalt Rubber at ADOT”, Report Number AZ-SP-8902, December 1989.
- [4] WAY, G. B. – “Flagstaff I-40 Overlay Project”, 4R Conference & Road Show, Cincinnati, Ohio, December 1989.
- [5] WAY, G. B. – “Flagstaff I-40 Asphalt Rubber Overlay Project Nine Years of Success”, Transportation Research Board, 78th Annual Meeting, Washington D.C., January, 2000.
- [6] LUKANEN, E. O.; STUBSTAD, R. N. and BRIGGS, R. C. – “Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement”, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-98-085, Washington D.C., June 2000.
- [7] RADD, L.; SABOUNDJIAN, S. and MINASSIAN, G. – “Field Aging Effects on the Fatigue of Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Concrete”, Transportation research Board, Annual Meeting CR Rom, Paper No. 01-3097, Washington D.C., January 2001.