



Universidade do Minho

[CN-05]

**Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A.

“Avaliação da actividade das fendas para estudo do reforço de pavimentos considerando a reflexão de fendas”

3<sup>rd</sup> International Symposium on Pavement Evaluation and Overlay Design,

Belém, Brasil, 1999, p. 91-97

# **3º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO - 3º SINAPPRE**

## **3<sup>rd</sup>.. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT EVALUATION AND OVERLAY DESIGN**

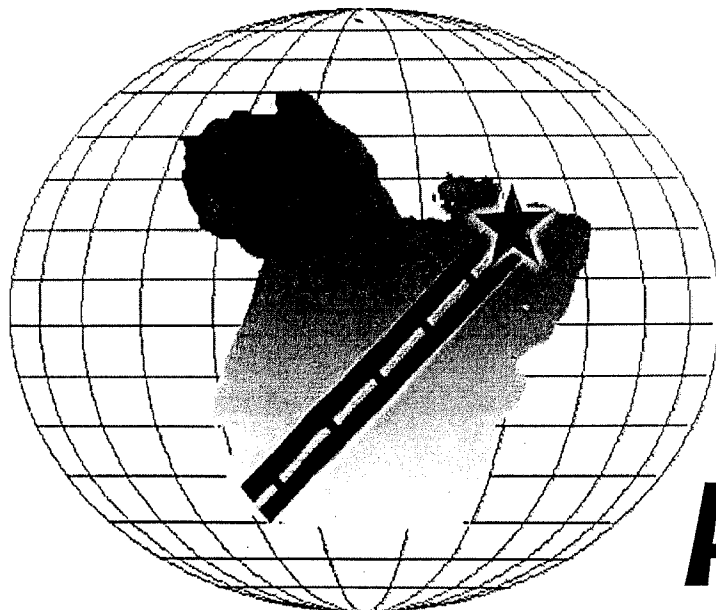
**Belém - Pará - Brasil  
28/11 a 03/12/1999**

**PATROCÍNIO:**



Governo do Estado do Pará

**REALIZAÇÃO:**



# **ANAIS**

# AVALIAÇÃO DA ACTIVIDADE DAS FENDAS PARA ESTUDO DO REFORÇO DE PAVIMENTOS CONSIDERANDO A REFLEXÃO DE FENDAS

Jorge C. Pais (1)  
Paulo A. A. Pereira (1)

**Resumo:** Neste trabalho é caracterizada a actividade das fendas existentes nos pavimentos flexíveis, entendendo-se por actividade das fendas os movimentos relativos entre os dois bordos de uma fenda quando da passagem de uma carga. Esta actividade foi avaliada em secções teste de pavimentos flexíveis da rede rodoviária portuguesa, recorrendo a um medidor de movimentos diferenciais entre bordos de fendas. A actividade das fendas, medida nos pavimentos fendilhados antes da aplicação dos respectivos reforços, será correlacionada com as características do pavimento existente e servirá para prever a actividade das fendas após reforço, função das características do reforço e do pavimento existente.

**Abstract:** This paper shows the flexible pavement crack activity where the term "crack activity" is used to designate the relative movements between the two sides of a crack when a load passes on a crack. The crack activity was evaluated in cross-sections of Portuguese flexible pavements, using a device that measure the relative movements between two points. The crack activity, measured in cracked pavements before overlay, is used to correlate with the pavement properties and to predict the crack activity after overlay as a function of overlay and existing pavement properties.

## 1 - INTRODUÇÃO

A reflexão de fendas é um fenómeno que se caracteriza pela progressão das fendas, existentes num pavimento fendilhado, até à superfície da camada de reforço do pavimento. A progressão das fendas nas misturas betuminosas, deve-se à elevada concentração de tensões que se verifica na proximidade das fendas, provocada pelos movimentos diferenciais, na direcção horizontal e vertical que os veículos induzem aos bordos das fendas. Estes movimentos são também designados por actividade das fendas.

As fendas existentes num pavimento, antes da colocação de um reforço, exibem uma actividade função das características físicas e mecânicas do pavimento e da carga aplicada. Estas mesmas fendas após a colocação de um reforço exibem uma actividade função da actividade antes de reforço e das características do reforço.

Apesar de importante o conhecimento da actividade das fendas antes de reforço, é a actividade das fendas após reforço que assume maior importância em termos de reforço de um pavimento dado ser responsável pela reflexão de fendas (Pais, 1999).

O conhecimento da actividade das fendas após reforço permite conhecer as solicitações que se verificam num reforço e que são responsáveis pela reflexão de fendas. Assim, estas solicitações podem ser utilizadas para avaliar a resistência das misturas betuminosas à reflexão de fendas.

## 2 - REFLEXÃO DE FENDAS PARA CAMADAS DE REFORÇO DE PAVIMENTOS

Os bordos das fendas estão sujeitos a movimentos cujas são função da natureza e da forma das fendas existentes, e do tipo de solicitações a que os bordos das fendas são submetidos. O principal factor responsável pelos movimentos dos bordos das fendas, para uma determinada solicitação, é a estrutura do pavimento onde a fenda se encontra, definida pela rigidez dos materiais e espessura das camadas.

Os movimentos dos bordos de uma fenda podem ser decompostos nos três movimentos elementares segundo o esquema clássico de Irwin (1957), apresentados na Figura 1, definidos pelos seguintes modos de abertura de fendas:

- Modo 1 que corresponde a uma abertura/fecho da fenda;
- Modo 2 que corresponde a uma deformação por corte normal à fenda;
- Modo 3 que corresponde a uma deformação por corte paralelo à fenda.

Os fenómenos de retracção térmica das misturas betuminosas provocam movimentos dos bordos das fendas do modo 1 (abertura/fecho). O tráfego, conforme a posição do veículo em relação à fenda e segundo a geometria desta, criará movimentos do modo 1, 2 ou 3.

Um veículo aproximando-se de uma fenda transversal provoca movimentos do modo 1 e 2. Quando a carga está sobre a fenda, os movimentos dos seus bordos são do modo 1, o mesmo se passando

quando o veículo circula sobre uma fenda longitudinal. Um veículo circulando sobre um bordo de uma fenda longitudinal contínua cria movimentos do modo 2, enquanto que na extremidade dessa mesma fenda os movimentos que aparecem são do modo 3. Estes exemplos são ilustrados na Figura 2.

Da análise dos modos de abertura de fendas para os dois principais tipos de fendas existentes nos pavimentos, conclui-se que os modos 1 e 2 são os mais frequentes, podendo estes modos ser caracterizados pelos movimentos horizontais e verticais entre os bordos das fendas, ou seja, pela actividade das fendas.

### 3 - CARACTERIZAÇÃO DAS SECÇÕES TESTE UTILIZADAS

Para a avaliação da actividade das fendas nos pavimentos fendilhados, foram definidas 14 secções teste distribuídas por toda a rede rodoviária portuguesa, compreendendo pavimentos com diferentes constituições e em diferentes estados de fendilhamento. Estas secções teste foram escolhidas de modo a abranger pavimentos com misturas betuminosas com diferentes módulos de rigidez e diferentes espessuras das várias camadas, localizados em diferentes zonas climáticas.

Uma campanha de sondagens permitiu a obtenção da espessura das camadas que compõem os pavimentos. A caracterização estrutural das secções teste foi realizada a partir da medição das deflexões com um deflectómetro de impacto.

A back-analysis de cada secção teste permitiu obter os módulos de rigidez de cada camada do pavimento, bem como uma espessura, em termos teóricos, para a camada de fundação do pavimento. Estes módulos encontram-se na Tabela 1, tendo sido agrupados em dois conjuntos, o correspondente à parte betuminosa e o correspondente à parte granular do pavimento. Este agrupamento permite uma mais fácil interpretação dos valores obtidos bem como uma mais fácil utilização em correlações a estabelecer posteriormente.

A equivalência entre os módulos de rigidez e espessuras entre camadas, foi determinada recorrendo à Equação 1 proposta por Huang (1993).

$$\frac{E_1 h_1^3}{12(1-\nu_1^2)} = \frac{E_2 h_2^3}{12(1-\nu_2^2)} \quad (1)$$

sendo:

$E_i$  = módulo de rigidez da camada  $i$ ;  
 $h_i$  = espessura da camada  $i$ ;  
 $\nu_i$  = coeficiente de Poisson da camada  $i$ .

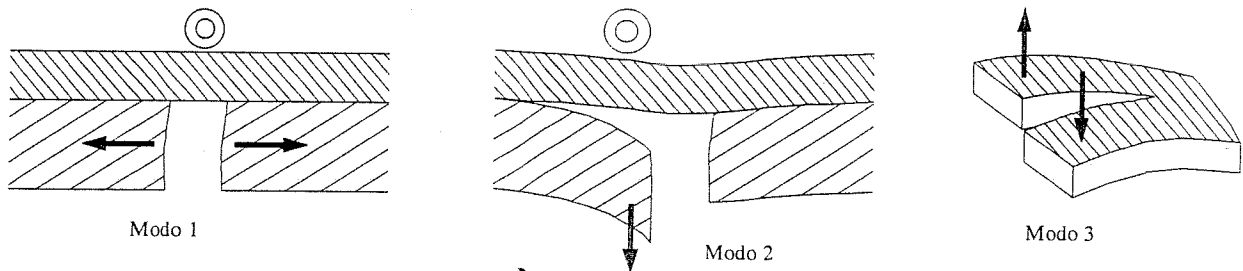


Figura 1 - Deslocamentos sofridos pelos bordos de uma fenda (Colombier, 1989)

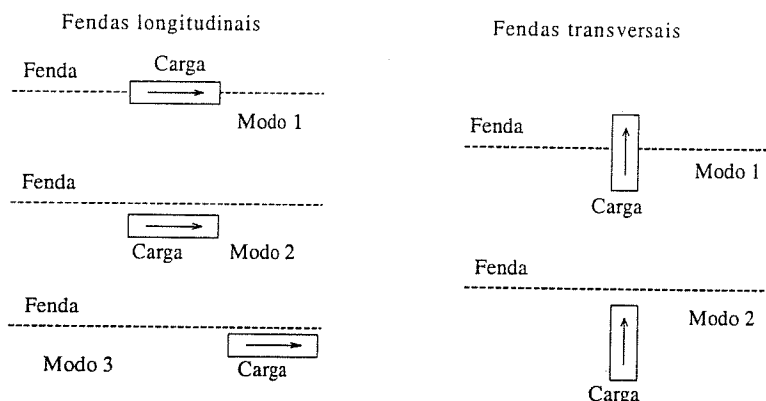


Figura 2 - Exemplos dos vários modos de abertura de fendas

Tabela 1 - Constituição da estrutura dos pavimentos das secções teste

Número da secção teste	Espessura da camada betuminosa	Espessura da camada granular	Módulo de rigidez da camada betuminosa (T=20°C)	Módulo de deformabilidade da camada granular
	(cm)	(cm)	(MPa)	(MPa)
1	20	246	1400	100
2	20	208	1200	180
3	17	255	2600	140
4	18	265	3400	160
5	29	281	1100	140
6	21	252	2000	130
7	32	289	1800	140
8	18	227	1200	160
9	22	291	3000	80
10	30	267	3000	120
11	32	331	4100	60
12	18	218	1800	120
13	29	272	1700	180
14	15	238	4900	80

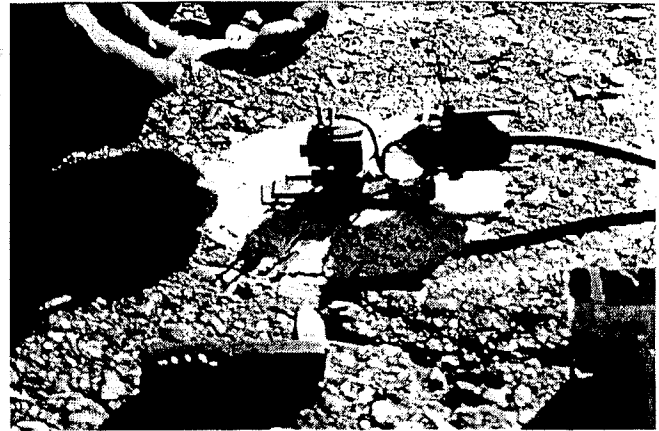


Figura 4 - Crack Activity Meter (CAM) colado ao pavimento

#### 4 - MEDIDOR DA ACTIVIDADE DAS FENDAS

Para medição da actividade das fendas nos pavimentos, foi desenvolvido por Rust (1987), um medidor da actividade das fendas, aparelho este que mede simultaneamente os movimentos diferenciais entre os dois bordos de uma fenda durante a passagem de uma carga sobre a mesma. Este aparelho é designado por Crack Activity Meter (CAM) e tem sido utilizado na avaliação da actividade das fendas para estudo da sua reflexão, do qual é exemplo o trabalho de De Bondt & Steenvoorden (1995).

O CAM é composto essencialmente por dois medidores de deslocamentos LVDTs (Linear Variable Differential Transformers), um colocado na vertical e o outro na horizontal relativamente à superfície do pavimento. Os LVDTs estão fixos a uma estrutura metálica, não magnética, em forma de L, permitindo deste modo a medição simultânea dos deslocamentos relativos dos bordos da fenda nas duas direcções. Na Figura 3 apresenta-se o CAM e as partes que o compõem.

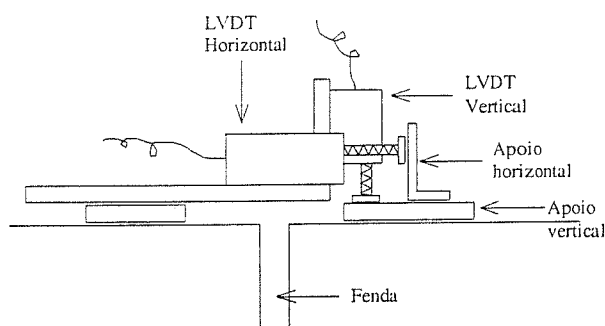


Figura 3 - Crack Activity Meter (CAM) e suas componentes

A fixação do CAM e do apoio horizontal na superfície do pavimento, é realizada sobre duas pequenas chapas metálicas, designadas por apoios verticais, coladas uma de cada lado da fenda.

Na Figura 4 pode verificar-se a colocação do CAM no pavimento para medição da actividade da fenda existente.

As medições da actividade das fendas são efectuadas perante a passagem de uma carga, habitualmente aplicada por um camião em andamento cujo eixo traseiro pesa 130 kN, o qual inicia o seu movimento alguns metros antes da fenda, passa ao lado do CAM, devendo a distância entre o camião e o CAM ser a menor possível, e termina o seu movimento alguns metros após a fenda, como se pode observar dos esquemas apresentados na Figura 5, para fendas transversais e longitudinais

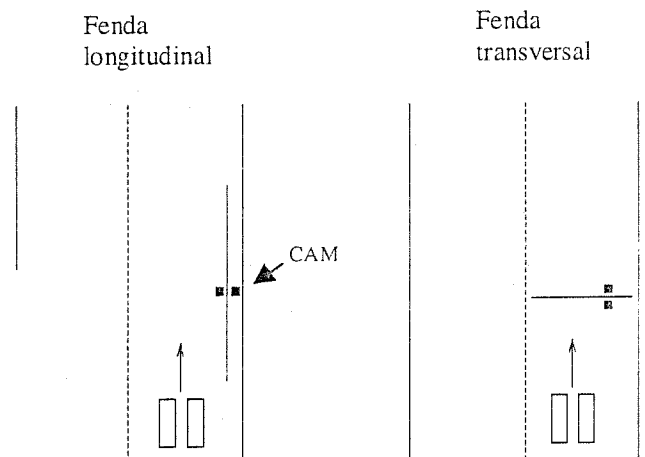


Figura 5 - Posicionamento do CAM e do eixo traseiro do camião nos ensaios de medição da actividade das fendas

#### 5 - ACTIVIDADE DAS FENDAS ANTES DE REFORÇO

A medição da actividade das fendas permitiu a obtenção das linhas de influência dessa mesma actividade, quando uma carga passa sobre a fenda. Estas linhas de influência apresentam grande importância para o estudo da reflexão de fendas. Os ensaios laboratoriais para avaliação da resistência das misturas betuminosas à reflexão de fendas, devem ser realizados aplicando as linhas de influência da actividade das fendas, medidas nestes ensaios.

Na Figura 6 apresentam-se as linhas de influência típicas da actividade de uma fenda longitudinal, sendo perceptível a passagem do eixo dianteiro e do eixo traseiro sobre a fenda.

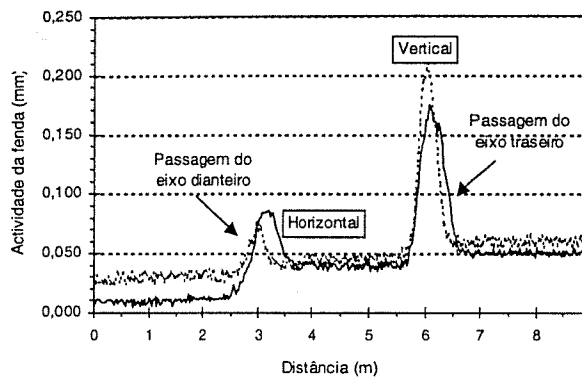


Figura 6 - Actividade típica das fendas longitudinais

A actividade horizontal das fendas longitudinais é de abertura seguido do fecho da fenda, verificando-se num reduzido espaço percorrido pela carga. A actividade vertical é habitualmente ligeiramente superior à actividade horizontal.

Na Figura 7 encontram-se as linhas de influência típicas da actividade de uma fenda transversal. Para estas fendas a actividade vertical caracteriza-se por um movimento de descida-subida-descida enquanto a actividade horizontal caracteriza-se por um movimento abertura-fecho-abertura-fecho.

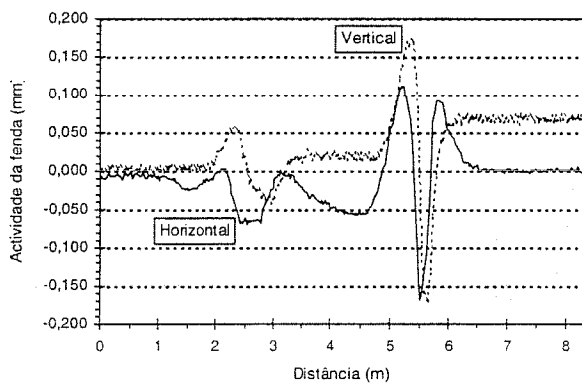


Figura 7 - Actividade típica das fendas transversais

As actividade das fendas medidas nas 14 secções teste, para os dois tipos de fendas, encontram-se presentes na Tabela 2.

## 6 - CORRELAÇÃO ENTRE A ACTIVIDADE DAS FENDAS E A ESTRUTURA DO PAVIMENTO

O modelo desenvolvido para correlação da actividade das fendas com a estrutura do pavimento, baseado na regressão linear de Piercewise (StatSoft, 1993) com ponto de quebra ( $Act_0$ ), relaciona a actividade da fenda com a abertura da fenda, a espessura equivalente total do pavimento e o correspondente módulo de rigidez, tal como se apresenta na Equação 2.

$$\begin{aligned} Act &= a_1 + b_1 \cdot af + c_1 \cdot h_t + d_1 \cdot E_t, Act < Act_0 \\ Act &= a_2 + b_2 \cdot af + c_2 \cdot h_t + d_2 \cdot E_t, Act \geq Act_0 \end{aligned} \quad (2)$$

sendo:

$Act$  = actividade horizontal ou vertical da fenda, em  $10^{-6}$  m;  
 $af$  = abertura da fenda, em mm;  
 $h_t$  = espessura equivalente total do pavimento, em cm;  
 $E_t$  = módulo de rigidez correspondente à espessura  $h_t$ , em MPa;  
 $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$  = constantes dadas pela Tabela 3.

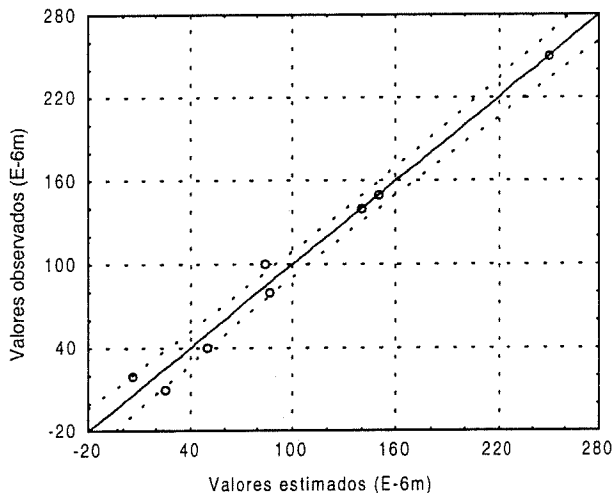
A correlação obtida para a actividade horizontal e vertical, tanto para as fendas transversais como para as longitudinais foi elevada, tendo-se obtido valores de  $R^2$  superiores a 0.93. Este facto pode ser verificado pela análise da Figura 8 em que se apresenta a os valores estimados pelo modelo para a actividade vertical das fendas transversais

Tabela 2 - Actividade das fendas medidas em ensaio de carga-descarga

Número da secção	Fendas Longitudinais			Fendas Transversais		
	Actividade Horizontal ( $10^{-6}$ m)	Actividade Vertical ( $10^{-6}$ m)	Temp. ( $^{\circ}$ C)	Actividade Horizontal ( $10^{-6}$ m)	Actividade Vertical ( $10^{-6}$ m)	Temp. ( $^{\circ}$ C)
1	100	60	11			
2	100	90	15	100	20	15
3	95	100	14	80	150	14
4	70	15	14	40	40	14
5	115	180	20	100	100	20
6	205	200	16	350	250	16
7	55	35	7			
8	50	25	17	50	80	17
9	70	35	15	60	140	15
10	80	100	8	125	250	8
11	230	360	16	30	10	16
12	155	105	10			
13	240	360	10			
14	170	130	11			

**Tabela 3 - Coeficientes para a Equação 2**

Tipo de fenda	Tipo de actividade	$a_1$ $a_2$	$b_1$ $b_2$	$c_1$ $c_2$	$d_1$ $d_2$	$Act_0$
Transversal	Horizontal	56.21 -88.19	5.30 -0.43	0.259 2.160	-0.00404 0.0163	123.9
Transversal	Vertical	232.5 -1204.3	1.043 105.4	-1.634 6.904	0.000206 0.10918	128.2
Longitudinal	Horizontal	211.7 2804.1	2.883 480.6	-1.339 -22.37	-0.00481 -0.3272	91.8
Longitudinal	Vertical	-14.43 17042	13.03 850.9	0.482 -147.2	-0.00783 -0.72201	107.3

**Figura 8 - Comparação dos valores estimados com os observados para a actividade vertical das fendas transversais**

O número de fendas utilizado para criar o modelo, apesar de não ser elevado, serviu para definir uma primeira aproximação para o cálculo da actividade das fendas, partindo do conhecimento das características do pavimento. No entanto, a sua aplicação deve revestir-se de alguns cuidados.

## 7 - ACTIVIDADE DAS FENDAS APÓS REFORÇO

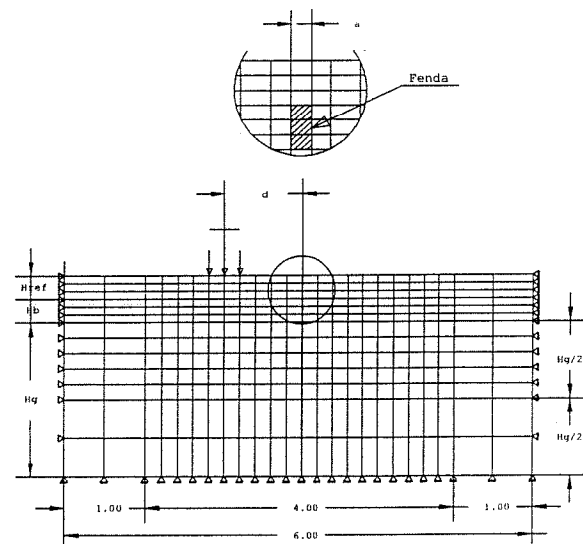
As campanhas de medições realizadas nos pavimentos para obtenção da actividade das fendas permitiram a medição dos movimentos que os bordos das fendas sofrem com a passagem de uma carga. Estas medições foram realizadas em pavimentos fendilhados, antes da aplicação de possíveis reforços.

Para o dimensionamento de um reforço não é necessário conhecer a actividade das fendas existentes, mas a actividade que essas fendas vão apresentar após a colocação do reforço do pavimento.

A partir do conhecimento da actividade das fendas do pavimento fendilhado, é necessário definir qual a nova actividade dessas mesmas fendas, após a realização do reforço do pavimento. A actividade das fendas após o reforço pode ser determinada, recorrendo à modelação do pavimento fendilhado, fazendo uso de técnicas de discretização, como por exemplo a que utiliza elementos finitos.

A modelação numérica de um pavimento fendilhado para obter a actividade das fendas previsível após reforço, foi realizada utilizando um programa de elementos finitos SAP 90, desenvolvido por Wilson & Habibullah (1991).

O modelo utilizado para a determinação da actividade das fendas após reforço é composto por uma camada granular de espessura  $H_g$  sobre o qual se encontra a camada betuminosa fendilhada de espessura  $H_{bet}$ . Sobre o pavimento existente é considerada uma camada com espessura  $H_{ref}$  que representa a camada de reforço do pavimento, tal como se indica na Figura 9.

**Figura 9 - Modelo de elementos finitos para determinação da actividade das fendas após reforço**

A aplicação do modelo proposto a uma situação concreta de reforço, neste caso à fenda transversal 4, conduziu a uma actividade após reforço, tal como se apresenta na Figura 10. Esta actividade refere-se a um reforço com uma camada cujo módulo de rigidez foi de 5000 MPa.

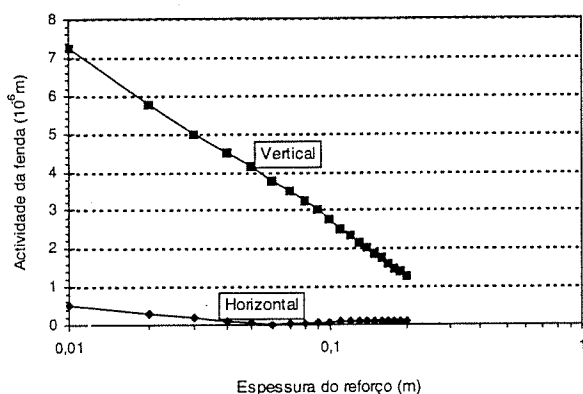


Figura 10 - Influência da espessura do reforço na actividade da fenda

A primeira constatação dos resultados da actividade após reforço, é a diferença entre a actividade vertical e a horizontal. Como se pode verificar, a actividade horizontal após reforço é quase nula, passando a haver principalmente actividade vertical. Antes do reforço a actividade horizontal e a vertical apresentavam valores da mesma ordem de grandeza e várias vezes superior à actividade após reforço.

A diminuição dos movimentos horizontais após reforço, deve-se à rigidez que o material betuminoso desenvolve quando é solicitado à tracção, comparativamente aos movimentos verticais quando o material é solicitado ao corte.

Os movimentos verticais continuam a existir uma vez que o nível de esforços verticais na zona da fenda é influenciado pela carga que solicita o pavimento. A actividade vertical após reforço é influenciada pela colocação do reforço, sendo significativa a sua relação directa com o aumento da espessura do reforço. Esta variação é linear e relaciona-se com o logaritmo da espessura do reforço, tal como se apresenta na Equação 3.

$$AVCR = a \cdot \ln(h_r) + b \quad (3)$$

sendo:

$AVCR$  = Actividade Vertical da fenda do pavimento Com Reforço, em  $10^{-6}$  m;

$h_r$  = espessura da camada betuminosa de reforço, em m;

$a, b$  = coeficientes função do pavimento existente.

Para o desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimento, que inclua a reflexão de fendas como um dos critérios de ruína, é importante encontrar uma relação entre as características do pavimento existente e a actividade após reforço, principalmente a actividade vertical.

Neste trabalho já foi apresentada a Equação 2 que relaciona a actividade das fendas antes do reforço com o pavimento existente, faltando apenas correlacionar a actividade das fendas antes de reforço com a actividade das fendas após reforço.

Para esta última correlação foi desenvolvida o modelo apresentado na Equação 4.

$$AVCR = (a \cdot \ln(h_r) + b \cdot \ln(E_r) + c \cdot \ln(af) + d) \cdot (e \cdot AVSR) + f \quad (4)$$

sendo:

$AVCR$  = actividade vertical da fenda após reforço, em  $10^{-6}$  m;

$h_r$  = espessura da camada betuminosa de reforço, em m;

$E_r$  = módulo de rigidez da camada de reforço, em MPa;

$af$  = abertura da fenda, em mm;

$AVSR$  = actividade vertical da fenda antes de reforço, em  $10^{-6}$  m;

$a, b, c, d, e, f$  = constantes dados pela Tabela 4.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi caracterizada a actividade de fendas existentes nos pavimentos flexíveis, de um conjunto de secções teste ao longo da rede rodoviária portuguesa, utilizando para o efeito o Crack Activity Meter (CAM), aparelho que mede simultaneamente os movimentos diferenciais entre os dois bordos de uma fenda aquando da passagem de uma carga.

A actividade das fendas longitudinais caracteriza-se por um movimento de abertura seguido de fecho, para a actividade horizontal, e um movimento de descida seguida de subida, para o caso da actividade vertical.

Nas fendas transversais verifica-se um comportamento de abertura-fecho-abertura-fecho, sendo estes movimentos responsáveis pelo ciclo de 3 esforços que os pavimentos sofrem com a passagem de uma carga. A actividade vertical destas fendas caracteriza-se por um movimento do tipo desce-sobe-desce.

As actividades medidas para as diversas fendas foram utilizadas para obter uma correlação com a estrutura do pavimento de que faziam parte. O modelo desenvolvido, baseado na regressão linear de Piercwise com ponto de quebra, relaciona a actividade da fenda com a abertura da fenda, a espessura total

Tabela 4 - Constantes da Equação 4 para as fendas transversais

Fendas	PQ	A	b	c	d	e	f	R <sup>2</sup>
Tranver-sais	Antes	-0.694	-2.588	0.2911	22.694	0.642	-3.595	0.8519
	Depois	-2.662	-7.496	2.4637	67.578	0.452	-19.98	0.9649
Longitu-dinais	Antes	-0.974	-2.668	0.3924	22.394	0.439	-1.293	0.4999
	Depois	-0.951	-3.148	0.5609	25.975	1.155	-1.992	0.9271

PQ – Ponto de quebra do modelo de previsão da actividade antes de reforço



do pavimento e o correspondente módulo de rigidez do pavimento.

O modelo utilizado para prever a actividade das fendas após reforço permitiu concluir que:

- A actividade vertical após reforço diminui com a espessura do reforço seguindo uma lei logarítmica e é fortemente reduzida após a colocação de um reforço;
- A actividade horizontal após reforço é praticamente nula.

A actividade vertical das fendas após reforço varia logaritmicamente com o módulo de rigidez do reforço e com a abertura da fenda, diminuindo com o módulo de rigidez e aumentando com a abertura das fendas.

Neste trabalho foi também desenvolvida uma correlação entre a actividade das fendas após reforço e a actividade das fendas antes de reforço, intervindo nesta correlação a espessura e módulo de rigidez do reforço e a abertura da fenda. Uma vez que já tinha sido correlacionada a actividade das fendas antes de reforço com as características do pavimento, é agora possível correlacionar a actividade das fendas após reforço com as características do pavimento existente e reforço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Colombier, G., 1989. *Fissuration des Chaussées, Nature et Origine des Fissures, Moyens pour Maitriser leur Remontée*. Proceedings of the First International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements.
- de Bondt, A.H. & M.P. Steenvoorden, 1995. *Reinforcement Test Section A50 (A6) Friesland*. Report 7-95-209-21, Road and Railroad Research Laboratory, Delft University of Technology.
- Huang, Y. H., 1993. *Pavement analysis and design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Irwin, G. R., 1957. *Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate*. Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pág. 387-409.
- Pais, J.C., 1999. *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga.
- Rust, F.C., 1987. *Load-associated crack movement and aspects of the rehabilitation of reflection cracking in cemented pavements*. M. Sc. Thesis, University of Pretoria.
- StatSoft, 1993. *Statistica for Windows– User Guide*. Release 4.5.
- Wilson, E.L. & A. Habibullah, 1991. *SAP90 Finite element analysis computer program*. CSI, Berkeley, California.