

Um Novo Método de Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis Considerando a Reflexão de Fendas

Jorge C. Pais¹, Paulo A. A. Pereira²

Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

RESUMO

No presente trabalho é proposto um método de dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis, considerando como critérios de ruína o aparecimento de fendas à superfície da camada de desgaste, resultantes da reflexão do fendilhamento existente nas camadas betuminosas do pavimento existente, bem como o fendilhamento por fadiga.

O método proposto baseia-se no dimensionamento estrutural corrente, acrescido duma verificação do critério de reflexão de fendas, tendo como base resultados laboratoriais de avaliação da reflexão de fendas em misturas betuminosas, realizados em deslocamento controlado e associados ao conceito de actividade das fendas após reforço.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente, o dimensionamento de reforços de pavimentos é realizado (Huang, 1993) considerando como critérios de ruína o aparecimento de fendas por fadiga nas misturas betuminosas e o aparecimento de deformações permanentes na zona de passagem dos rodados dos veículos não sendo habitual a consideração da reflexão de fendas.

A secção de um pavimento reforçado que contém uma fenda apresenta uma reduzida resistência estrutural comparativamente ao resto do pavimento. Quando esta secção é solicitada à flexão ou ao corte, as camadas de reforço estão a ser particularmente mobilizadas para resistir aos esforços resultantes. Assim, um pavimento reforçado apresenta inúmeras zonas com reduzida capacidade resistente, como é perceptível pela análise da Figura 1, não contempladas nos métodos de dimensionamento de reforços de pavimentos, sendo estas responsáveis pela ruína prematura dos reforços dos pavimentos.

A passagem de uma carga sobre a zona de uma fenda, provoca nesta secção da camada de reforço elevados níveis de tensões e extensões, aos quais estão associados movimentos diferenciais entre os dois bordos da fenda, responsáveis pela propagação da fenda existente para as camadas do reforço do pavimento, fenómeno este designado por “reflexão de fenda”.

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 (Pais *et al.*, 1998).

¹ Professor Auxiliar

² Professor Associado

Apesar da importância do 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 a principal responsável pela reflexão de fendas (Pais, 1999).

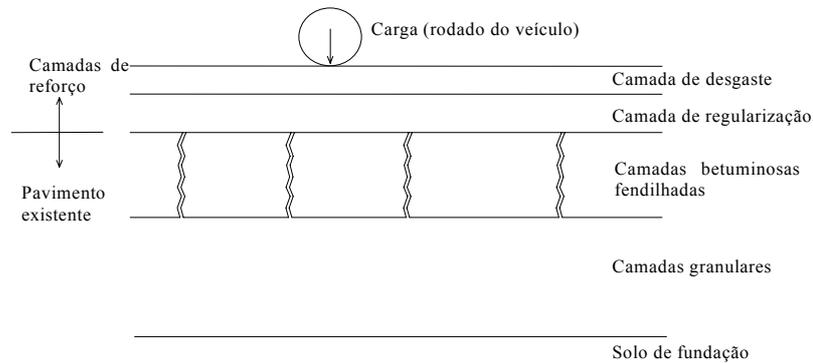


Figura 1 – Representação esquemática da estrutura do pavimento após reforço

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 função da natureza e da forma das fendas existentes, e do tipo de solicitações a que os bordos das fendas são submetidos. Estes movimentos podem ser decompostos nos três movimentos elementares segundo o esquema clássico de Irwin (1957), apresentados na Figura 2, 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.

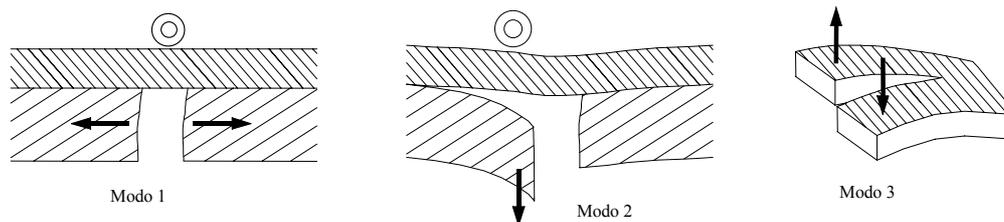


Figura 2 - Deslocamentos sofridos pelos bordos de uma fenda

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, conforme é ilustrado na Figura 3.

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.

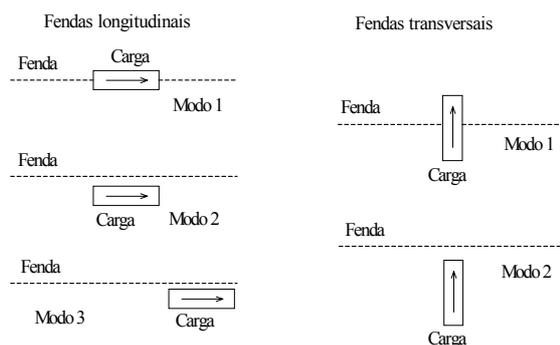


Figura 3 - Exemplos dos vários modos de abertura de fendas

3. MEDIDOR DA ACTIVIDADE DAS FENDAS

Para medição da actividade das fendas nos pavimentos, foi desenvolvido por Rust (1987) um medidor da actividade das fendas (Crack Activity Meter, CAM). Este aparelho mede simultaneamente os movimentos diferenciais entre os dois bordos de uma fenda quando da passagem de uma carga sobre o pavimento.

O CAM é composto por dois medidores de deslocamentos LVDTs (Linear Variable Differential Transformers), um colocado na vertical e o outro na horizontal relativamente à superfície do pavimento conforme se indica na Figura 4 (a).

As medições da actividade das fendas são efectuadas perante a passagem de uma carga a 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. Na Figura 4 (b) apresenta-se esquematicamente duas possibilidades de realização das medições para fendas transversais e longitudinais.

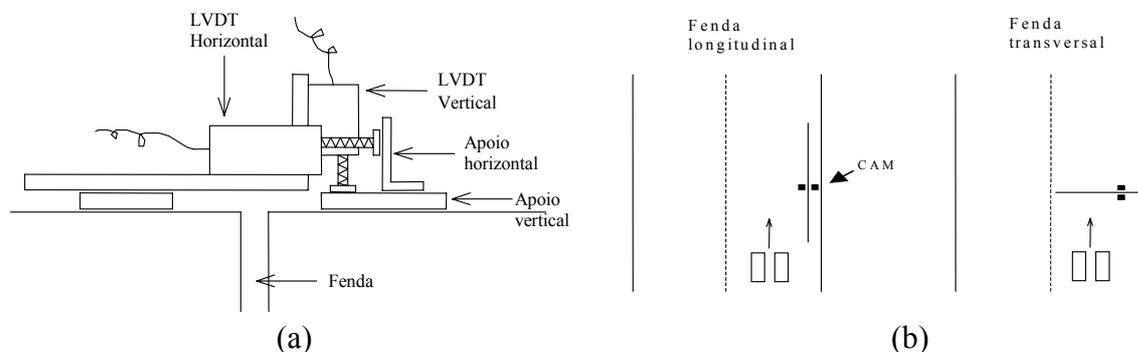


Figura 4 – (a) Crack Activity Meter (CAM); (b) Posicionamento do CAM e do eixo traseiro do camião nos ensaios de medição da actividade das fendas

4. ACTIVIDADE DAS FENDAS ANTES DE REFORÇO

Para a avaliação da actividade das fendas nos pavimentos fendilhados, foram definidas 14 secções teste distribuídas pela rede rodoviária portuguesa, compreendendo pavimentos com diferentes constituições e em diferentes estados de fendilhamento.

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.

Na Figura 5 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.

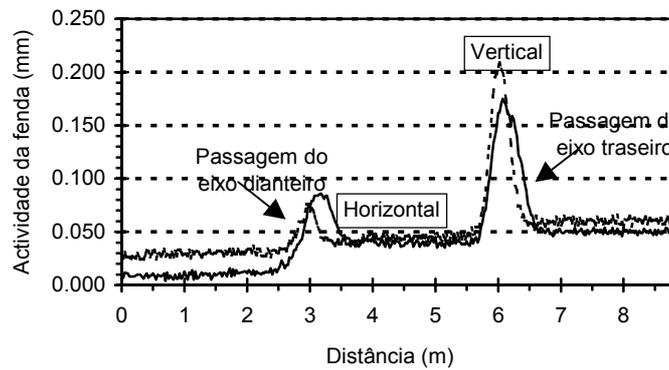


Figura 5 - Actividade típica das fendas longitudinais

A actividade horizontal das fendas longitudinais é de abertura seguida de fecho da fenda, ocorrendo num reduzido espaço percorrido pela carga. A actividade vertical é habitualmente ligeiramente superior à actividade horizontal.

Na Figura 6 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.

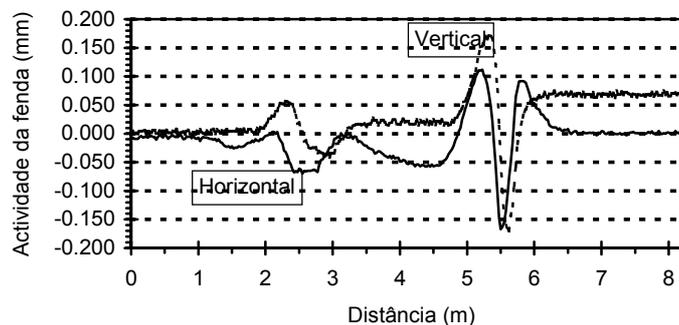


Figura 6 - Actividade típica das fendas transversais

A actividade das fendas antes de reforço foi correlacionada com as características das secções teste através de um modelo baseado na regressão linear de Piercwise com ponto de quebra (Act_0). O modelo que relaciona a actividade da fenda com a abertura da fenda, a espessura equivalente total do pavimento e o correspondente módulo de rigidez é apresentado na Equação 1, para o qual o ajuste, expresso pelo R^2 , foi superior a 0.93.

$$Act = a_1 + b_1.af + c_1.h_t + d_1.E_t, Act < Act_0 \quad (1)$$

$$Act = a_2 + b_2.af + c_2.h_t + d_2.E_t, Act \geq Act_0$$

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;
- $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2$ e d_2 = constantes dadas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes para a Equação 1

Tipo de fenda	Tipo de actividade	a_1	b_1	c_1	d_1	Act ₀
		a_2	b_2	c_2	d_2	
Transversal	Horizontal	56.21	5.30	0.259	-0.00404	123.9
		-88.19	-0.43	2.160	0.0163	
Transversal	Vertical	232.5	1.043	-1.634	0.000206	128.2
		-1204.3	105.4	6.904	0.10918	
Longitudinal	Horizontal	211.7	2.883	-1.339	-0.00481	91.8
		2804.1	480.6	-22.37	-0.3272	
Longitudinal	Vertical	-14.43	13.03	0.482	-0.00783	107.3
		17042	850.9	-147.2	-0.72201	

5. ACTIVIDADE DAS FENDAS APÓS REFORÇO

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 actividade das fendas após reforço do pavimento. Esta actividade foi determinada recorrendo à modelação do pavimento fendilhado utilizando elementos finitos. Foi utilizado para este efeito o programa SAP90 numa análise elástica linear com elementos sólidos em 3D. Para o reforço de um pavimento fendilhado foram obtidos os resultados da Figura 7 em que se apresenta a evolução da actividade das fendas após reforço em função da espessura de reforço.

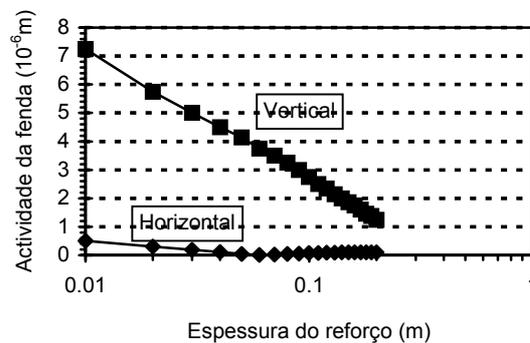


Figura 7 - Influência da espessura do reforço na actividade da fenda após reforço

A principal 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.

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 1 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 desenvolvido o modelo traduzido pela Equação 2.

$$AVCR = (a \cdot \ln(h_r) + b \cdot \ln(E_r) + c \cdot \ln(af) + d) \cdot (e \cdot AVSR) + f \quad (2)$$

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 dadas pela Tabela 2.

Tabela 2 - Constantes da Equação 2

Fendas	PQ	a	b	c	d	e	f	R ²
Tranversais	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
Longitudinais	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

6. EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE REFLEXÃO DE FENDAS

Existem muitos tipos de ensaios com carregamento repetido (Vanelstraete & Francken, 1997) destinados a avaliar a resistência das misturas betuminosas à reflexão de fendas, devido às acções térmicas, tráfego ou a combinação destas duas. Relativamente ao desenvolvimento do ensaio e forma de análise dos resultados, os ensaios podem ser agrupados em duas classes: os ensaios em tensão controlada e os ensaios em extensão controlada.

Nos ensaios em tensão controlada, a progressão do fendilhamento com o tempo ou com o número de aplicações de carga é acompanhada ao longo de todo o ensaio. Este é um dos procedimentos mais utilizados para estudo do fendilhamento, devendo o equipamento de ensaio estar preparado para a avaliação da progressão geométrica do fendilhamento.

Os ensaios em extensão controlada não necessitam do acompanhamento da progressão do fendilhamento. Nestes ensaios, a análise do comportamento de uma mistura betuminosa é realizada através da evolução da rigidez da mistura betuminosa.

Neste último tipo de ensaios, o equipamento é na maior parte dos casos mais simples e menos dispendioso, assim como a análise dos resultados do ensaio.

O ensaio para estudo da reflexão de fendas em camadas de reforço utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Sousa *et al.* (1996), permitindo simular a zona da camada de reforço que se encontra sobre as fendas, tal como se encontra representado na Figura 8 (a). O dispositivo de fendilhamento, apresentado esquematicamente na Figura 8 (b), permite a aplicação simultânea de esforços horizontais e verticais quando ligado a dois actuadores.

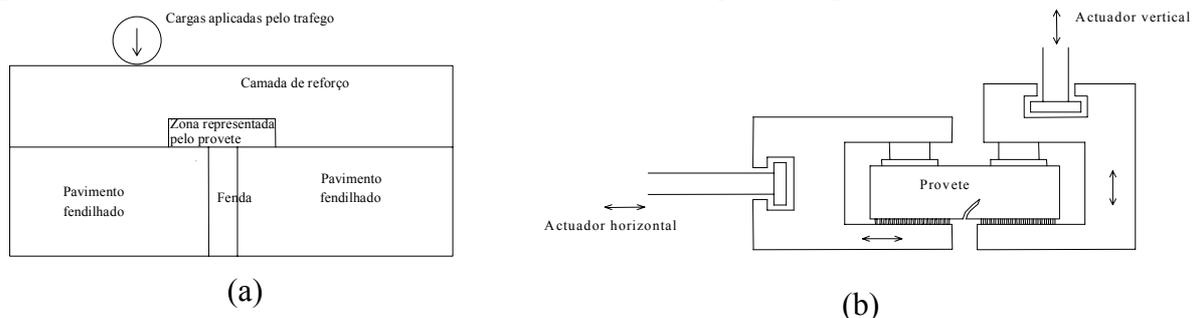


Figura 8 (a) Localização do provete a ser sujeito à reflexão de fendas no ensaio desenvolvido por Sousa *et al.* (1996); (b) Representação esquemática do dispositivo de fendilhamento

Este dispositivo de ensaio apresenta como principais vantagens o facto de permitir a simulação da abertura da fenda e a possibilidade de aplicar esforços horizontais e verticais em simultâneo.

O dispositivo de ensaio é constituído por duas peças metálicas em forma de U, no meio das quais o provete é fixado. Inferiormente o provete é colado ao dispositivo de ensaio que simula a fenda existente no pavimento fendilhado, enquanto que superiormente, 4 pistões aplicam um esforço simulando a carga aplicada pelo rodado ao pavimento.

7 – MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE REFLEXÃO DE FENDAS

O ensaio utilizado para simular em laboratório a reflexão de fendas para camadas de reforço de pavimentos foi estudado através de elementos finitos de modo a permitir uma melhor compreensão do fenómeno. Numa primeira fase identificou-se a zona do provete mais sujeita aos esforços responsáveis pela reflexão de fendas e numa segunda fase foi estudada a influência das variáveis responsáveis pela reflexão de fendas.

Na Figura 9 (a) encontra-se a deformada da malha de elementos finitos para uma situação corrente de reforço enquanto na Figura 9 (b) é apresentada a configuração das tensões de Von Mises ao longo do provete, sendo visíveis os dois pontos de maior concentração de tensões e o rápido decréscimo das mesmas com o afastamento à zona da fenda. Esta concentração de tensões é a principal responsável pela reflexão de fendas.

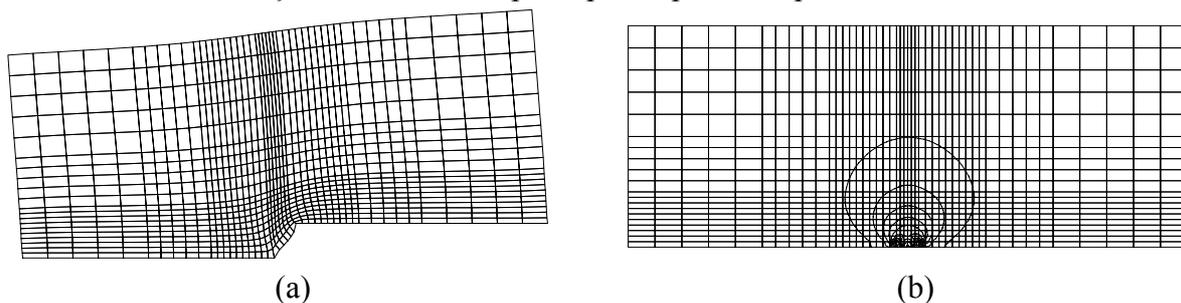


Figura 9 – (a) Deformada típica do ensaio de reflexão de fendas; (b) Configuração típica das tensões de Von Mises no ensaio de reflexão de fendas

O estudo da influência da espessura da camada de reforço e do nível de actividade após reforço na reflexão de fendas, é apresentado na Figura 10, para uma camada de reforço com um módulo de rigidez de 5000 MPa e uma abertura de fenda de 2 mm, simulada numericamente por uma abertura de 6 mm, correspondendo a 3 vezes a abertura da fenda medida no pavimento. A influência da espessura da camada de reforço foi determinada para os valores de 4, 5 e 6 cm, espessuras a utilizar nos ensaios laboratoriais de reflexão de fendas.

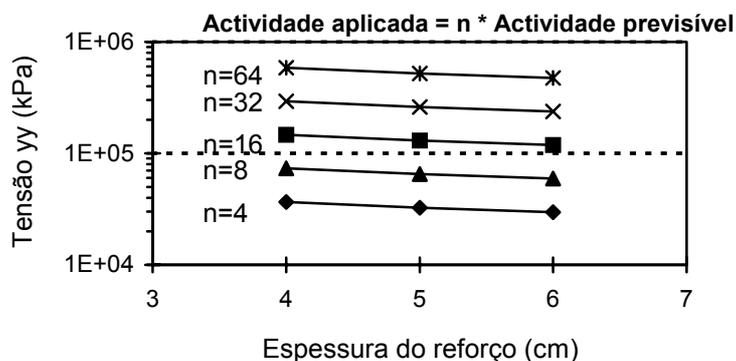


Figura 10 - Influência da espessura do reforço e actividade na tensão instalada no provete

A influência no nível de actividade das fendas após reforço foi observada para 5 níveis de actividade, 4, 8, 16, 32 e 64 vezes, o nível previsível de actividade para um caso concreto de reforço.

A análise da influência da espessura da camada de reforço permite concluir que o seu aumento linear permite reduzir de uma forma logarítmica o nível de tensão que é aplicado ao provete. Nestas condições, é de esperar que nos ensaios laboratoriais, ao aumento da espessura da camada de reforço corresponda um aumento da vida à fadiga em reflexão de fendas.

O nível de actividade das fendas após reforço aumenta, de forma logarítmica e proporcional a uma potência de 2, a tensão instalada no provete. Assim, é de esperar que o aumento da actividade das fendas após reforço diminua a vida à fadiga em reflexão de fendas.

8 – SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA REFLEXÃO DE FENDAS

Os ensaios de reflexão de fendas são realizados aplicando ao provete a actividade que as fendas apresentam após reforço, sendo esta obtida por uma estimativa numérica tendo como base as características do pavimento existente e do reforço. Uma vez que após reforço as fendas apresentam principalmente actividade vertical sendo a actividade horizontal praticamente nula, a actividade horizontal aplicada em laboratório correspondeu a 10% da actividade vertical, tanto para o caso de fendas transversais como para longitudinais.

Os ensaios laboratoriais foram realizados à temperatura de 20 °C e a uma frequência de aplicação de cargas de 10 Hz, tendo-se imposto uma abertura de fenda de 6 mm no dispositivo de fendilhamento.

Os ensaios de reflexão de fendas foram realizados em extensão controlada, pelo que a análise da vida à fadiga é definida pela evolução da rigidez com o número de ciclos de deslocamento. Neste caso, a vida à fadiga é definida como o número de ciclos de carga que conduzem à redução de 50% da rigidez inicial do provete.

A evolução da rigidez com o número de ciclos de deslocamento pode apresentar vários tipos distintos de comportamento, sendo o mais frequente a evolução logarítmica da rigidez ao longo do ensaio, tal como se apresenta na Figura 11.

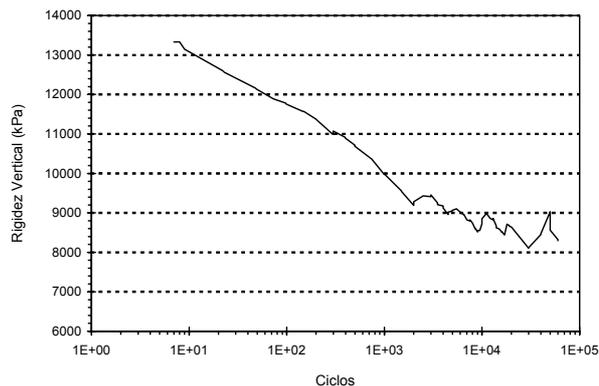


Figura 11 - Evolução logarítmica da rigidez vertical na zona da fenda durante um ensaio de reflexão de fendas

Da análise da evolução da rigidez ao longo do ensaio de reflexão de fendas é possível verificar um comportamento suave desta evolução até ao momento em que são verificadas certas perturbações, evidenciando a rotura do provete. Isto pode ser justificado pelo facto de enquanto o provete não atinge a rotura, o mastic ser o responsável pela resistência à fadiga da mistura betuminosa, verificando-se que após a rotura, este mastic perde as suas

capacidades de resistência à fadiga, passando os agregados a resistir às acções aplicadas. O ponto em que se verificam estas perturbações não é constante de ensaio para ensaio, verificando-se o seu aparecimento para reduções de rigidez da ordem dos 25% até reduções da ordem dos 50%, sendo de prever que a rotura se verifique neste intervalo.

Deste modo, o estudo da vida à fadiga em reflexão de fendas foi realizado de uma forma paramétrica para reduções da rigidez desde 20 até 50%, definindo-se para tal um parâmetro, designado de **Coefficiente Definidor da Rotura (CDR)** num ensaio de reflexão de fendas, que corresponde ao valor percentual que a rigidez apresenta, comparativamente à rigidez inicial, quando se atinge a rotura do provete.

A definição do parâmetro CDR necessita da realização de um reforço num pavimento fendilhado e da observação do aparecimento de fendas por reflexão na superfície da camada de reforço. Por comparação da vida à fadiga em reflexão de fendas obtida em laboratório, com o tempo que as fendas demoraram a aparecer à superfície do reforço, poder-se-á definir o valor do CDR.

Os resultados do programa de ensaios para as fendas transversais são apresentados na Figura 12, para os vários coeficientes definidores da rotura. Da análise dos resultados é visível o aumento da vida à fadiga em reflexão de fendas com a diminuição da actividade após reforço, podendo utilizar-se a Equação 3 para definir esta influência.

$$VFRF = a.AVCR^b \quad (3)$$

sendo:

$VFRF$ = vida à fadiga em reflexão de fendas;

$AVCR$ = actividade vertical após reforço;

a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

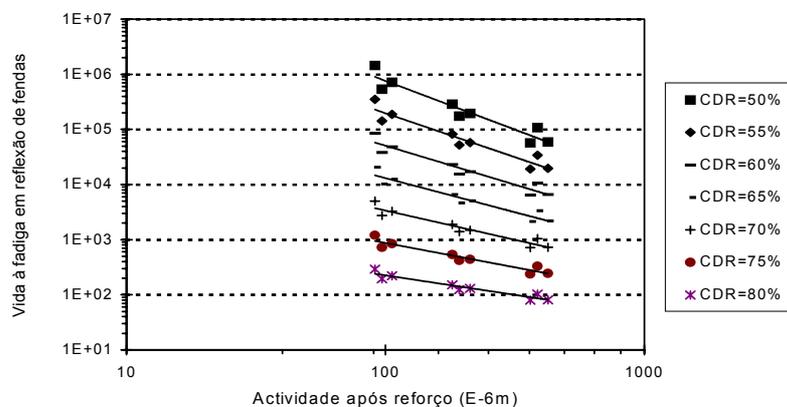


Figura 12 - Influência da actividade após reforço na vida à fadiga em reflexão de fendas transversais

9 – MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO

Neste ponto é proposto um método de dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis, considerando como critério de ruína o aparecimento de fendas à superfície da camada de desgaste, resultantes da reflexão do fendilhamento existente nas camadas betuminosas do pavimento existente.

O método de dimensionamento de reforços proposto apoia-se no dimensionamento estrutural corrente, acrescido duma verificação do critério de reflexão de fendas, tendo como base os resultados laboratoriais de avaliação da reflexão de fendas em misturas betuminosas. A sequência de dimensionamento proposta encontra-se esquematizada na Figura 13.

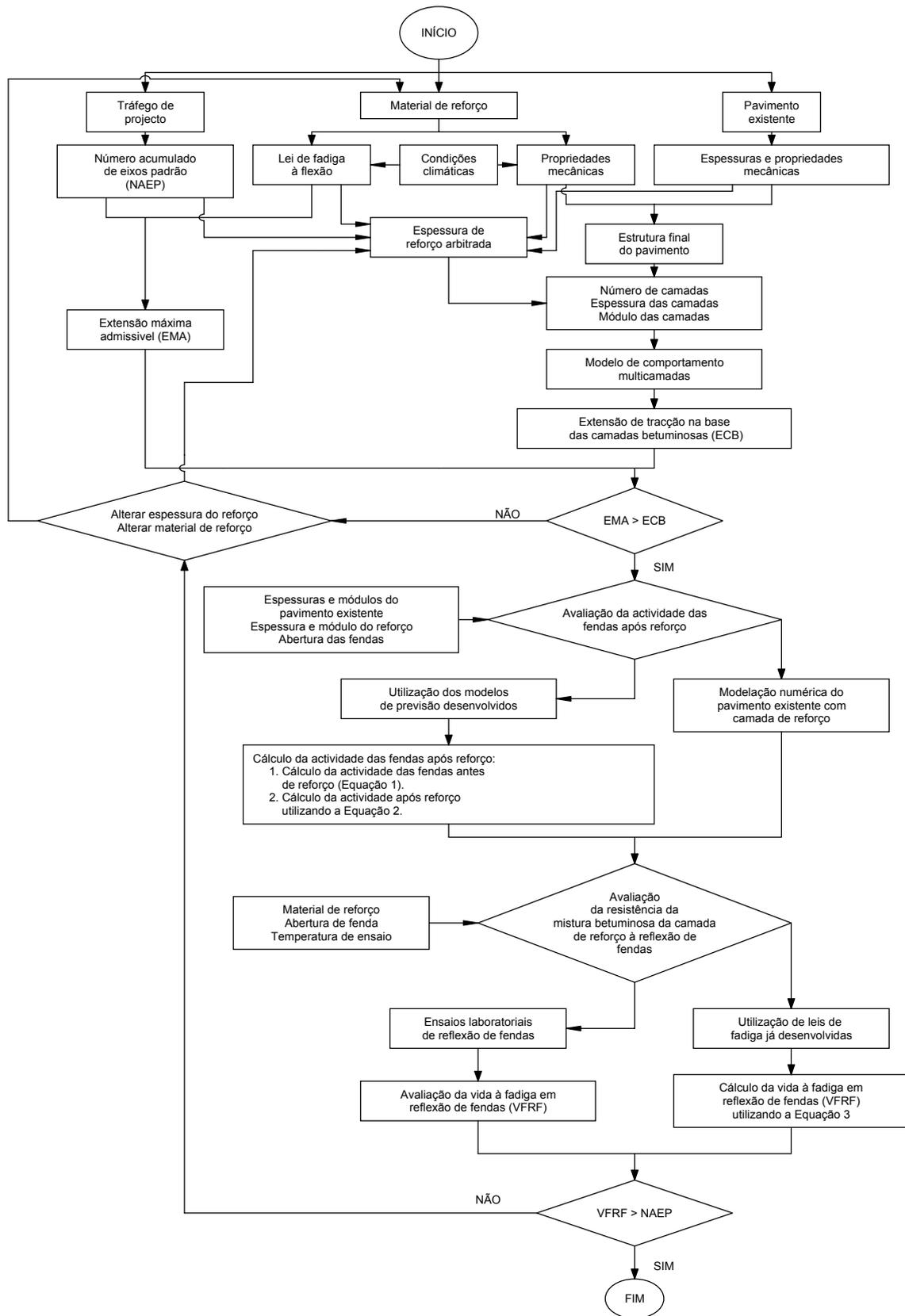


Figura 13 - Metodologia proposta para o dimensionamento de reforços de pavimentos considerando o critério de reflexão de fendas

Os dados iniciais para o dimensionamento continuam a ser o tráfego, as características do pavimento existente e das camadas de reforço, nomeadamente espessuras e propriedades mecânicas dos materiais das camadas, e a lei de fadiga, tanto para o material que constitui o pavimento existente como para o material das camadas de reforço.

O tráfego e a lei de fadiga permitem obter o nível de extensão horizontal de tracção máxima admissível nas camadas betuminosas. Esta extensão permite, conjuntamente com o apoio de um programa de análise multicamadas, obter a espessura para a camada de reforço. Esta espessura apenas cumpre o critério do aparecimento de fendilhamento devido à fadiga dos materiais betuminosos.

A nova componente da proposta para o dimensionamento de reforços, consiste na verificação do critério de aparecimento de fendilhamento devido à reflexão de fendas. Conhecendo a espessura da camada betuminosa de reforço, resultante da análise estrutural, a actividade das fendas após reforço pode ser determinada utilizando as Equações 1 e 2 atrás apresentadas. Estas expressões relacionam a actividade antes de reforço com o pavimento existente e a actividade após reforço com a actividade antes de reforço.

A actividade após reforço é utilizada para determinar a vida à fadiga em reflexão de fendas, recorrendo à Equação 3, a qual se aplica tanto para fendas transversais como para fendas longitudinais.

O processo de dimensionamento prossegue com a comparação entre o tráfego de projecto e a vida à fadiga em reflexão de fendas. Se a vida à fadiga em reflexão de fendas for superior ao tráfego de projecto considera-se que o dimensionamento está concluído. Caso contrário, a espessura do reforço deverá ser aumentada até que a condição anterior seja verificada ou dever-se-ão alterar os materiais de reforço e reiniciar o dimensionamento. A espessura final obtida por este processo, conduz a um reforço do pavimento em que se verificam os dois mecanismos de ruína em estudo, o aparecimento de fendas por fadiga e por reflexão de fendas.

10 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um novo método de dimensionamento de reforços de pavimentos que considera a reflexão de fendas como um dos mecanismos de ruína dos reforços dos pavimentos. Este método baseia-se no dimensionamento estrutural corrente, acrescido duma verificação do critério de reflexão de fendas, tendo como base resultados laboratoriais de avaliação da reflexão de fendas em misturas betuminosas, realizados em deslocamento controlado e associados ao conceito de actividade das fendas após reforço.

Deste modo, ao longo do trabalho foi apresentada uma metodologia para avaliação da actividade das fendas dos pavimentos, antes e após o respectivo reforço, bem como uma metodologia para a avaliação da resistência das misturas betuminosas aos esforços responsáveis pela reflexão de fendas.

Relativamente à caracterização da actividade de fendas concluiu-se que 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 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.

Neste trabalho também foi apresentado um método para caracterizar a resistência à reflexão de fendas de misturas betuminosas através de um ensaio que aplica simultaneamente esforços horizontais e verticais a um provete de mistura betuminosa, simulando o reforço de um pavimento.

A simulação laboratorial do fenómeno da reflexão de fendas foi realizada em ensaios em extensão controlada, sendo a análise da rotura do provete definida pela evolução da rigidez durante o ensaio.

A existência de perturbações no comportamento da rigidez ao longo dos ensaios de reflexão de fendas conduziu à introdução de um parâmetro designado por **Coefficiente Definidor da Rotura** num ensaio de reflexão de fendas, tendo este coeficiente sido utilizado para o estudo paramétrico dos resultados de reflexão de fendas.

11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Huang, Y. H., 1993. *Pavement analysis and design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Pais, J.C., 1999. *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga.
- Pais, J.C., P.A.A. Pereira & J.B. Sousa, 1998. *Field measurements of crack activity and laboratory simulation of crack reflection phenomenon in pavement overlays*. Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfield, Trondheim.
- 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.
- Sousa, J.B., S. Shatnawi, & J. Cox, 1996. *An approach for investigating reflective fatigue cracking in asphalt-aggregate overlays*. Proceedings of the Third International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements.
- Vanelstraete, A. & L. Francken, 1997. *Prevention of Reflective Cracking in Pavements*. RILEM Report 18, E & FN Spon, UK.