



Universidade do Minho

[CN-08]

Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Azevedo, M.C.M.

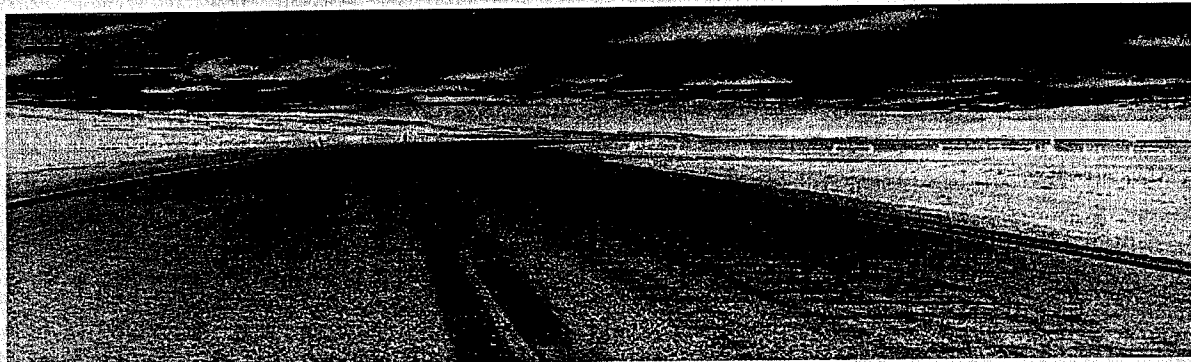
“A reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis”

1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, Lisboa, 2000, p. 627-

637

ESTRADA 2000

1º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS



A QUALIDADE RODOVIÁRIA
NA VIRAGEM DO SÉCULO
28 - 30 Novembro 2000
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

CRP.

CENTRO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS

A REFLEXÃO DE FENDAS NO DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

JORGE PAIS

Professor Auxiliar da Universidade do Minho

PAULO PEREIRA

Professor Associado da Universidade do Minho

MARIA DA CONCEIÇÃO M. AZEVEDO

Doutora em Engenharia Civil

RESUMO

No presente trabalho é apresentado um método de dimensionamento de reforços de pavimentos rodoviários flexíveis em que se considera a reflexão de fendas como um dos mecanismos de ruína a que o reforço está sujeito, além do fendilhamento por fadiga e das deformações permanentes.

O método proposto recorre ao conceito de actividade das fendas para avaliar os movimentos a que as estas estão sujeitas quando da passagem dos veículos. Estes movimentos após reforço permitem avaliar a resistência das misturas betuminosas à propagação de fendas, que conjuntamente com a resistência aos habituais mecanismos de ruína, permitem a realização do dimensionamento do reforço.

1. INTRODUÇÃO

Um pavimento rodoviário flexível está sujeito a degradações ao longo do seu período de vida que reduzem a capacidade estrutural e a aptidão funcional para que foi projectado sendo necessária a sua reabilitação. Esta reabilitação é realizada actuando de diversas formas, em função do seu estado estrutural e funcional, considerando os níveis de qualidade que se pretendem manter ou atingir.

As intervenções ao nível dos pavimentos degradados passam pelo seu reforço estrutural, recuperando o pavimento também as suas características

funcionais. O reforço de pavimentos é o método mais utilizado para a reabilitação de pavimentos degradados, verificando-se muitas vezes que o seu desempenho não corresponde ao desejado (Rigo, 1993). A propagação das fendas existentes nas camadas fendilhadas do pavimento antigo para as camadas de reforço é um dos principais factores responsáveis pelo fendilhamento prematuro dos reforços de pavimentos.

A existência de camadas betuminosas fendilhadas, sobre as quais são colocadas as camadas de reforço do pavimento, provoca um funcionamento estrutural do pavimento diferente daquele verificado para o caso dos pavimentos novos. Os reforços de pavimentos continuam a estar sujeitos aos mecanismos de ruína dos pavimentos novos, fendilhamento por fadiga e deformações permanentes. No entanto, além destes mecanismos de ruína, verificam-se outros fenómenos estruturais, associados ao desempenho dos materiais existentes, que condicionam o comportamento do pavimento.

As camadas de reforço de um pavimento, ao serem aplicadas sobre um pavimento fendilhado, encontram-se sobre zonas de rigidez estrutural muito variável. Em determinados locais apresentam uma rigidez elevada, enquanto outras zonas apresentam uma rigidez muito reduzida (locais onde se situam as 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.

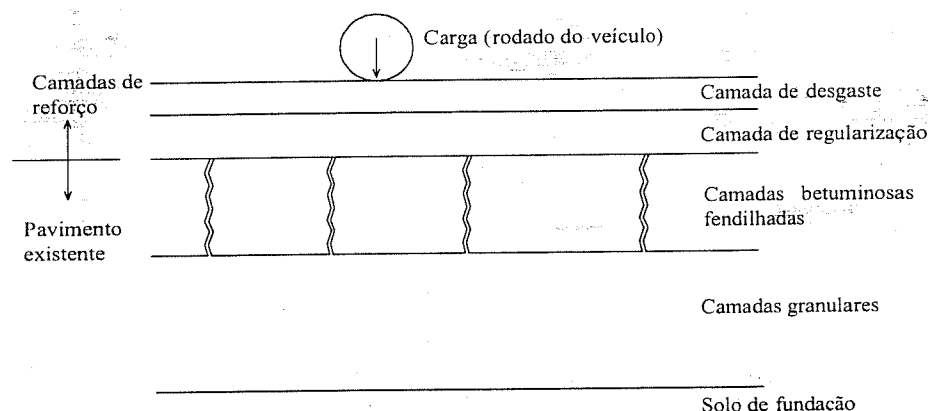


Figura 1 – Representação esquemática da estrutura do pavimento após reforço

A REFLEXÃO DE FENDAS NO DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

JORGE PAIS

PROFESSOR AUXILIAR, UNIVERSIDADE DO MINHO

PAULO PEREIRA

PROFESSOR ASSOCIADO, UNIVERSIDADE DO MINHO

MARIA DA CONCEIÇÃO AZEVEDO

DOCTORA EM ENGENHARIA CIVIL, CA&MD

RESUMO

No presente trabalho é apresentado um método de dimensionamento de reforços de pavimentos rodoviários flexíveis em que se considera a reflexão de fendas como um dos mecanismos de ruína a que o reforço está sujeito, além do fendilhamento por fadiga e das deformações permanentes.

O método proposto recorre ao conceito de actividade das fendas para avaliar os movimentos a que as estas estão sujeitas quando da passagem dos veículos. Estes movimentos após reforço permitem avaliar a resistência das misturas betuminosas à propagação de fendas, que conjuntamente com a resistência aos habituais mecanismos de ruína, permitem a realização do dimensionamento do reforço.

1. INTRODUÇÃO

Um pavimento rodoviário flexível está sujeito a degradações ao longo do seu período de vida que reduzem a capacidade estrutural e a aptidão funcional para que foi projectado sendo necessária a sua reabilitação. Esta reabilitação é realizada actuando de diversas formas, em função do seu estado estrutural e funcional, considerando os níveis de qualidade que se pretendem manter ou atingir.

As intervenções ao nível dos pavimentos degradados passam pelo seu reforço estrutural, recuperando o pavimento também as suas características funcionais. O reforço de pavimentos é o método mais utilizado para a reabilitação de pavimentos degradados, verificando-se muitas vezes que o seu desempenho não corresponde ao desejado (Rigo, 1993). A propagação

das fendas existentes nas camadas fendilhadas do pavimento antigo para as camadas de reforço é um dos principais factores responsáveis pelo fendilhamento prematuro dos reforços de pavimentos.

A existência de camadas betuminosas fendilhadas, sobre as quais são colocadas as camadas de reforço do pavimento, provoca um funcionamento estrutural do pavimento diferente daquele verificado para o caso dos pavimentos novos. Os reforços de pavimentos continuam a estar sujeitos aos mecanismos de ruína dos pavimentos novos, fendilhamento por fadiga e deformações permanentes. No entanto, além destes mecanismos de ruína, verificam-se outros fenómenos estruturais, associados ao desempenho dos materiais existentes, que condicionam o comportamento do pavimento.

As camadas de reforço de um pavimento, ao serem aplicadas sobre um pavimento fendilhado, encontram-se sobre zonas de rigidez estrutural muito variável. Em determinados locais apresentam uma rigidez elevada, enquanto outras zonas apresentam uma rigidez muito reduzida (locais onde se situam as 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.

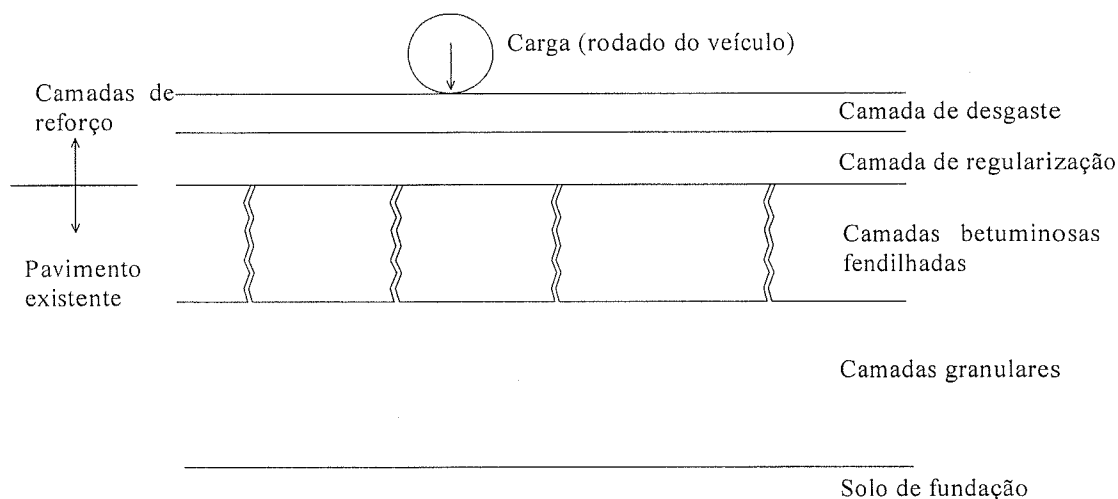


Figura 1 – Representação esquemática da estrutura do pavimento após reforço

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, J. C. *et al*, 1998).

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, J. C., 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. AVALIAÇÃO DA ACTIVIDADE DAS FENDAS

2.1. Actividade das fendas antes de reforço

A avaliação da actividade das fendas nos pavimentos, antes da colocação do reforço, pode ser medida recorrendo a um aparelho desenvolvido por Rust (1987) e denominado por Crack Activity Meter (CAM). Este aparelho, composto por dois medidores de deslocamentos (LVDTs), mede simultaneamente os movimentos diferenciais entre os dois bordos de uma fenda quando da passagem de uma carga sobre o pavimento, conforme se ilustra na Figura 2.

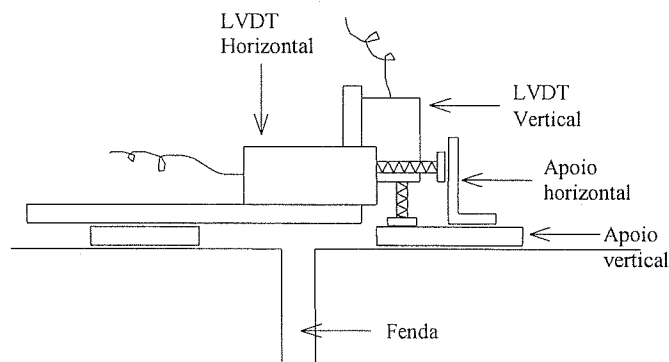


Figura 2 – Medidor da Actividade das Fendas (CAM)

Na Figura 3 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.

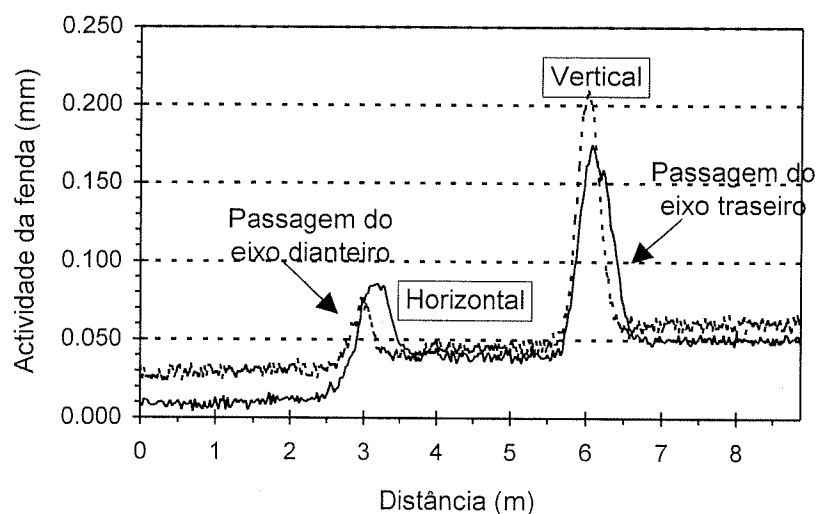


Figura 3 – Actividade típica das fendas longitudinais

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

Na Figura 4 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.

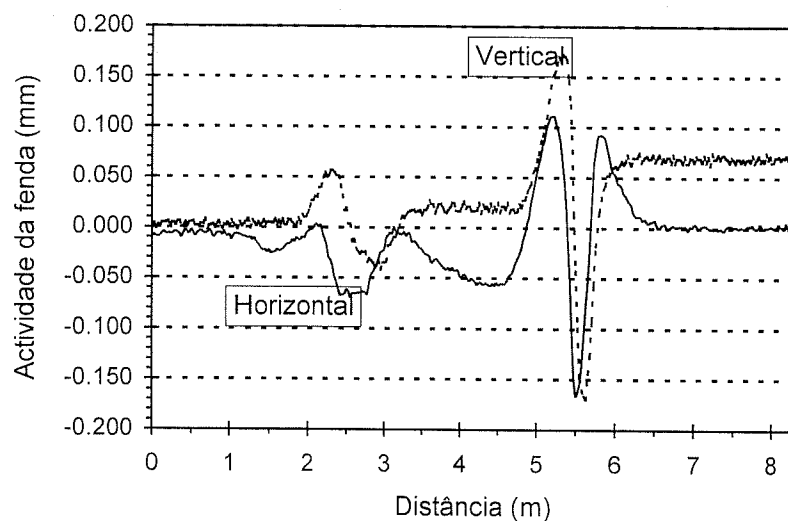


Figura 4 – Actividade típica das fendas transversais

Para este trabalho, a actividade das fendas antes de reforço foi avaliada em 14 secções teste distribuídas pela rede rodoviária portuguesa, compreendendo pavimentos com diferentes

constituições e em diferentes estados de fendilhamento, nos quais foram medidas as espessuras das camadas e as respectivas características estruturais.

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.

$$\begin{aligned} Act &= a_1 + b_1.af + c_1.h_t + d_1.E_t, Act < Act_0 \\ Act &= a_2 + b_2.af + c_2.h_t + d_2.E_t, Act \geq Act_0 \end{aligned} \quad (1)$$

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	

2.2. Actividade das fendas após reforço

A actividade das fendas após reforço não é de fácil medição no pavimento reforçado. A sua medição seria possível caso o CAM fosse instalado dentro do pavimento ou se durante a fase de colocação do reforço fosse deixado um buraco no pavimento para posterior instalação do CAM.

Assim sendo, a utilização de modelos numéricos, por exemplo recorrendo a elementos finitos, afigura-se como o método mais prático para a determinação da actividade das fendas após

reforço. Deste modo, 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 5 em que se apresenta a evolução da actividade das fendas após reforço em função da espessura de reforço.

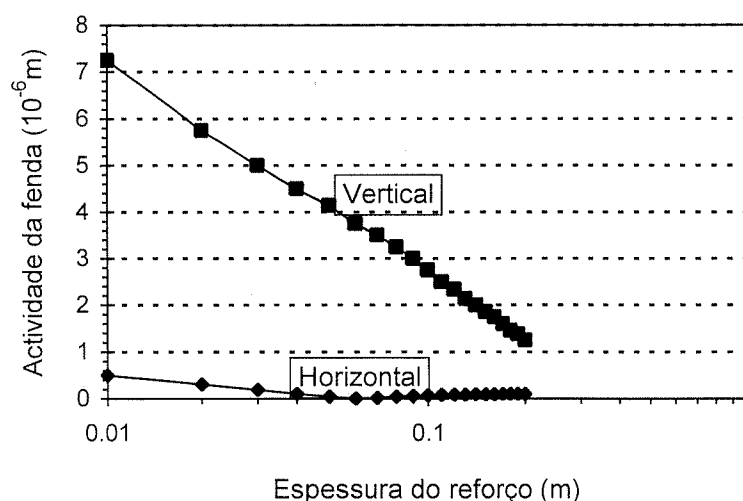


Figura 5 – Influência da espessura do reforço na actividade da fenda após reforço

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, havendo 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. Esta relação encontra-se expressa pela Equação 2 fazendo uso da actividade vertical das fendas antes de reforço.

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

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

3. SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA REFLEXÃO DE FENDAS

Neste trabalho foi utilizado o ensaio de corte desenvolvido por Sousa *et al.*(1996) para o estudo laboratorial da reflexão de fendas. Este ensaio permite simular a zona da camada de reforço que se encontra sobre as fenda, tal como se encontra representado na Figura 6, utilizando o dispositivo de ensaio esquematizado na Figura 7.

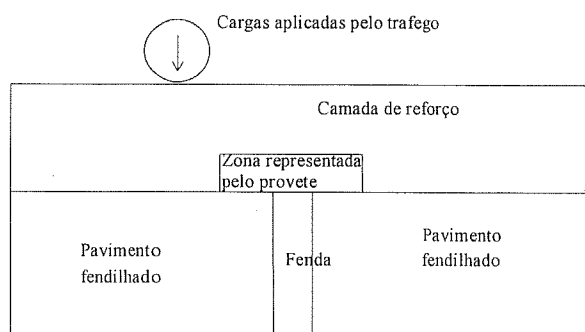


Figura 6 – Localização do reforço objecto de simulação pelo ensaio de reflexão de fendas

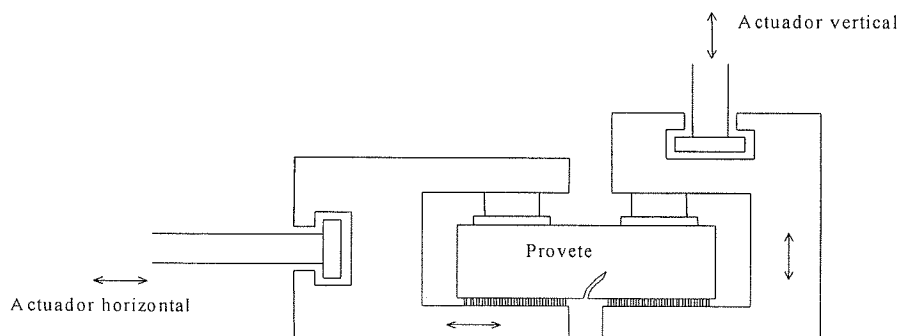


Figura 7 – Representação esquemática do dispositivo de fendilhamento

Este dispositivo de ensaio apresenta como principais vantagens o facto de permitir a simulação da abertura da fenda e a possibilidade de aplicar, em simultâneo ao provete, a actividade horizontal e vertical das fendas após reforço.

Nos ensaios de reflexão de fendas realizados em deslocamento controlado, 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. A evolução exponencial, tal como acontece com os ensaios de fadiga por flexão, acontece num número reduzido de ensaios (Pais, J. C., 1999).

A realização de ensaios de reflexão de fendas aplicando a actividade após reforço torna-se inviável em termos laboratoriais dado o tempo que um ensaio com estas características demoraria. Assim, os ensaios de reflexão de fendas devem ser realizados aplicando níveis de actividade superiores ao que o reforço está sujeito, sendo a vida à fadiga em reflexão de fendas, para o nível de actividade desejado, obtida por extrapolação.

Ensaio de reflexão de fendas realizados para obtenção da lei de fadiga de uma mistura betuminosa permitiram concluir que a vida à fadiga em reflexão de fendas é proporcional à actividade após reforço, podendo esta proporcionalidade ser expressa na Equação 3.

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

sendo:

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

$AVCR$ = actividade vertical após reforço;

a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

4. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

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. A sequência de dimensionamento proposta encontra-se esquematizada na Figura 8 e 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.

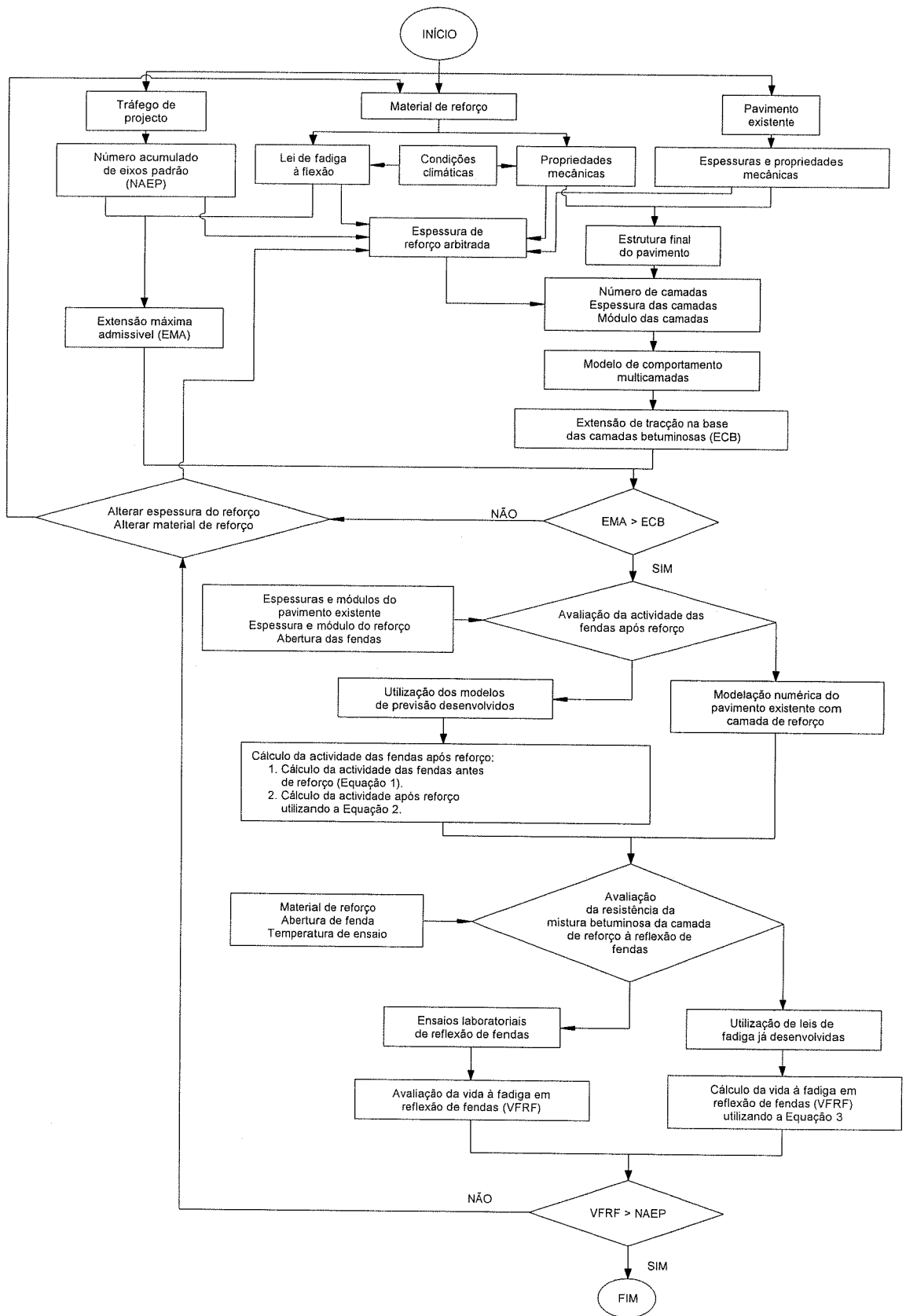


Figura 8 – Metodologia proposta para o dimensionamento de reforços de pavimentos considerando o critério de reflexão de fendas

O método de dimensionamento consiste num processo iterativo em que, partindo da espessura de reforço necessária para resistir à fadiga e às deformações permanentes, é avaliada a vida à fadiga em reflexão de fendas, que comparada com o tráfego permite dimensionar o reforço.

5. 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Rigo, J. "General introduction, main conclusions of the 1989 Conference on Reflective Cracking in Pavements, and future prospects". Proceedings of the Second International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. Liege. 1993. 18 páginas.
- [2] - Pais, J., Pereira, P. e Sousa, J. "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. 1998. 10 páginas.
- [3] - Pais, J. "Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis". Tese de Doutoramento, Universidade do Minho. Braga. 1999.
- [4] - Rust, F. "Load-associated crack movement and aspects of the rehabilitation of reflection cracking in cemented pavements". M. Sc. Thesis, University of Pretoria. 1987.
- [5] - Sousa, J., Shatnawi, S. e Cox J. "An approach for investigating reflective fatigue cracking in asphalt-aggregate overlays". Proceedings of the Third International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. Maastricht. 1996. 10 páginas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RIGO, J. – “General introduction, main conclusions of the 1989 Conference on Reflective Cracking in Pavements, and future prospects”. Proceedings of the Second International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. Liege. 1993. 18 páginas.
- [2] PAIS, J., PEREIRA, P. e SOUSA, J. – “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. 1998. 10 páginas.
- [3] PAIS, J. – “Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis”. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho. Braga. 1999.
- [4] RUST, F. – “Load-associated crack movement and aspects of the rehabilitation of reflection cracking in cemented pavements”. M. Sc. Thesis, University of Pretoria. 1987.
- [5] – SOUSA, J., SHATNAWI, S. e COX J. – “An approach for investigating reflective fatigue cracking in asphalt-aggregate overlays”. Proceedings of the Third International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. Maastricht. 1996. 10 páginas.