



Universidade do Minho

[CN-04]

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

“Avaliação da resistência das misturas betuminosas à reflexão de fendas”

3rd International Symposium on Pavement Evaluation and Overlay Design,
Belém, Brasil, 1999, p. 99-103

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

3rd.. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT EVALUATION AND OVERLAY DESIGN

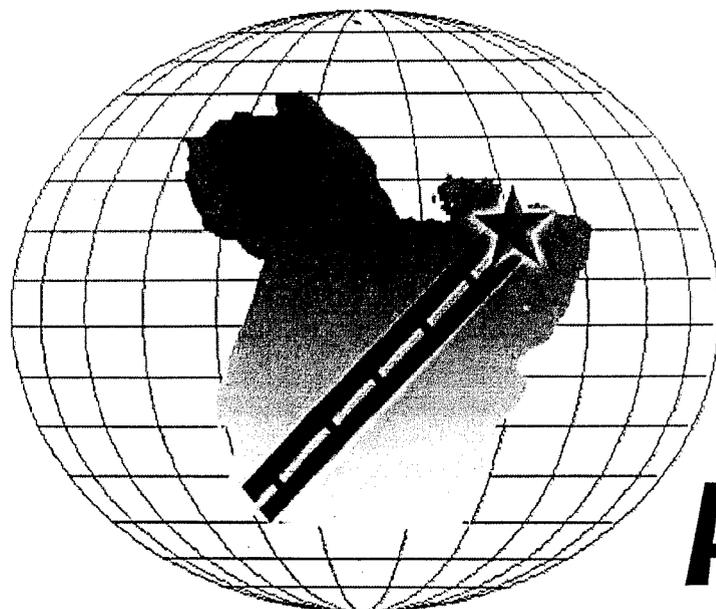
**Belém - Pará - Brasil
28/11 a 03/12/1999**

PATROCÍNIO:



Governo do Estado do Pará

REALIZAÇÃO:



ANAIS

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS MISTURAS BETUMINOSAS À REFLEXÃO DE FENDAS

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

Resumo: Neste trabalho é avaliada laboratorialmente a resistência das misturas betuminosas à reflexão de fendas recorrendo a um equipamento de ensaio que aplica simultaneamente esforços horizontais e verticais a um provete de mistura betuminosa. Os ensaios são realizados em deslocamento controlado aplicando-se ao provete os movimentos que as fendas sofrem com a passagem dos veículos. A amplitude destes movimentos corresponde à actividade que as fendas apresentam após reforço, devendo ser estimada recorrendo a modelação numérica. A resistência à reflexão de fendas foi avaliada para fendas longitudinais e transversais tendo-se aplicado em laboratório as respectivas linhas de influência tipo medidas nos pavimentos para cada tipo de orientação das fendas.

Abstract: In this paper the reflective cracking resistance in asphalt mixtures is evaluated using a laboratory test that apply simultaneously horizontal and vertical movements to a specimen of asphalt mixture. Laboratory tests are executed in displacement control where the specimen is subjected to the movements exhibited by the cracks. The movement's amplitude is defined by the crack activity after overlay estimated using numerical models. The reflective cracking resistance was evaluated to transverse and longitudinal cracks applying, in laboratory, the waves that define the crack activity measured in pavements.

1 - INTRODUÇÃO

Os países cuja rede rodoviária se encontra completa, debatem-se com o problema dos seus itinerários rodoviários, construídos ao longo dos últimos anos, se aproximarem ou já terem atingido o termo da sua vida de projecto. Os pavimentos destas estruturas têm que ser reabilitados, o que obriga a administração a canalizar uma parcela cada vez mais importante dos seus orçamentos para a sua reabilitação.

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.

O dimensionamento de reforços de pavimentos é realizado 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.

Deste modo, a secção do pavimento

reforçado que contém uma fenda, apresenta uma reduzida resistência estrutural. 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, 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, em que a rigidez da estrutura do pavimento é inferior à que se verifica nas zonas adjacentes, 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. Estas tensões e extensões são responsáveis pela propagação da fenda existente para as camadas do reforço do pavimento, fenómeno designado por "reflexão de fenda". Quanto maiores forem as tensões e extensões desenvolvidas, mais rápida será a propagação da fenda até à superfície do pavimento.

Assim, torna-se importante conhecer a resistência que as misturas betuminosas podem mobilizar quando sujeitas a esforços que conduzem à reflexão de fendas. Estes esforços resultam dos movimentos relativos entre os bordos das fendas quando da passagem das cargas sobre estas mesmas fendas, tal como é evidenciado por Pais (1999).

2 - EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE REFLEXÃO DE FENDAS

Existem muitos tipos de ensaios com carregamento repetido 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 1. O dispositivo de fendilhamento, apresentado esquematicamente na Figura 2 e do qual se apresenta uma fotografia na Figura 3, permite a aplicação simultânea de esforços horizontais e verticais.

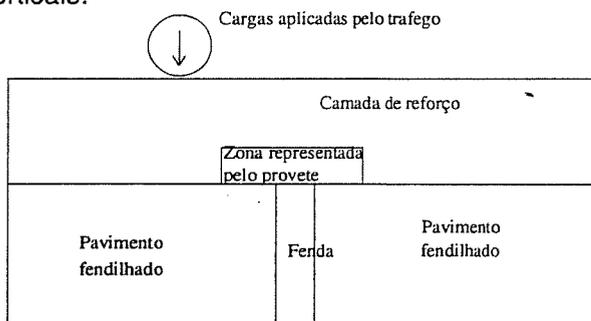


Figura 1 - Localização do provete a ser sujeito à reflexão de fendas no ensaio desenvolvido por Sousa et al (1996)

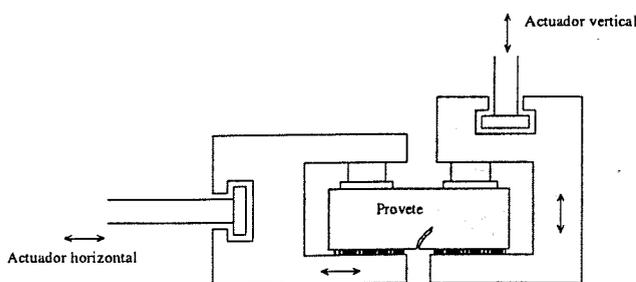


Figura 2 - Representação esquemática do dispositivo de fendilhamento

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.

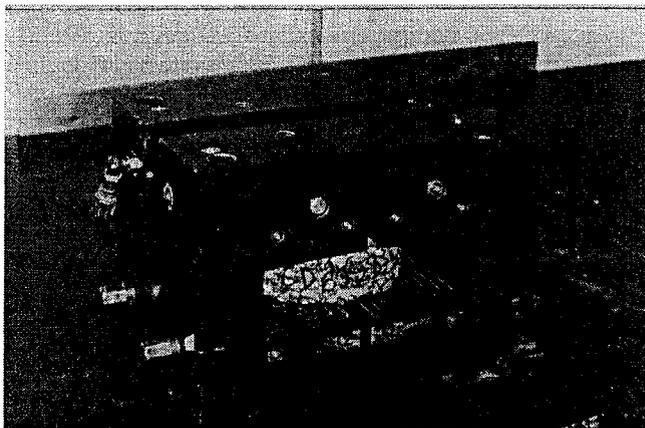


Figura 3 - Fotografia do dispositivo de fendilhamento

3 - 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 é estudado através de modelação numérica de modo a permitir uma melhor compreensão do fenómeno. Esta modelação foi realizada recorrendo ao programa de elementos finitos SAP 90. A modelação a fazer será baseada numa análise bidimensional, em estado plano de deformação e assumindo um comportamento elástico linear do material.

O modelo de elementos finitos utilizado para a modelação do ensaio de reflexão de fendas está representado na Figura 4. O modelo é constituído por uma camada de espessura h representando um corte diametral vertical do provete perpendicularmente à fenda e correspondendo o comprimento do modelo ao diâmetro do provete. Na disposição da malha de elementos finitos é visível um refinamento da malha na zona da fenda, dado nesta zona verificar-se a concentração de tensões, responsável pelo aparecimento de fendas.

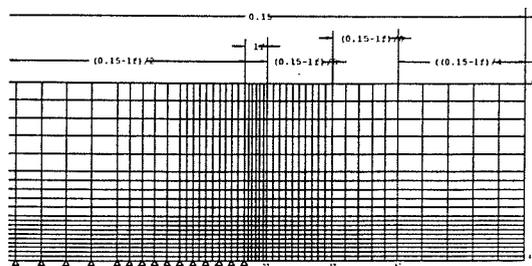


Figura 4 - Modelo de elementos finitos para simular o ensaio de reflexão de fendas

A aplicação deste modelo de elementos finitos, a um caso genérico de reforço de pavimento, foi realizada em primeiro lugar para identificar a zona do proвете mais sujeita aos esforços responsáveis pela reflexão de fendas e numa segunda fase para estudar a influência das variáveis responsáveis pela reflexão de fendas.

Na Figura 5 encontra-se a deformada da malha de elementos finitos para uma situação corrente de reforço enquanto na Figura 6 é apresentada a configuração das tensões de Von Mises ao longo do proвете, 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.

Poder-se-á então afirmar que existem dois pontos de elevada concentração de tensões, os dois bordos da fenda, sendo num destes pontos que se irá verificar a rotura por fadiga do proвете durante o ensaio.

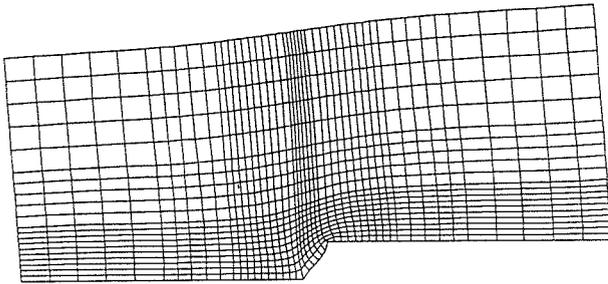


Figura 5 - Deformada típica do ensaio de reflexão de fendas

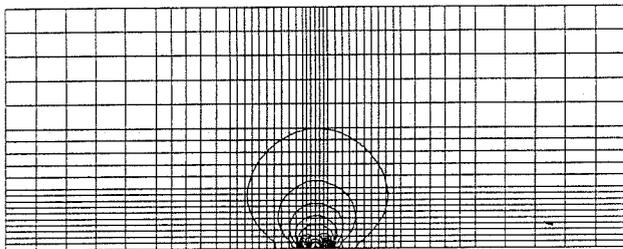


Figura 6 - Configuração típica das tensões de Von Mises no ensaio de reflexão de fendas

Do ponto de vista da mecânica da fractura, as principais variáveis responsáveis pela reflexão de fendas, para um caso concreto de reforço de pavimentos, são a espessura e módulo de rigidez da camada betuminosa de reforço, a intensidade dos movimentos entre os bordos das fendas, esta dependente da espessura de reforço, como demonstrado por Pais et al (1998).

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 7, 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.

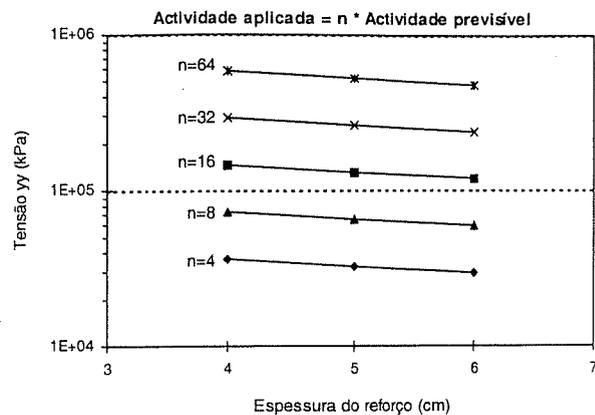


Figura 7 - Influência da espessura do reforço e actividade das fendas na tensão instalada no proвете

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 proвете. 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 proвете. Quanto aos resultados laboratoriais, é de esperar que o aumento do nível de actividade das fendas após reforço diminua a vida à fadiga em reflexão de fendas.

4 - SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA REFLEXÃO DE FENDAS

O estudo numérico do ensaio de reflexão de fendas permitiu avaliar qualitativamente a vida à fadiga em reflexão de fendas, para diversas condições de ensaio, por comparação do nível de tensão instalada no proвете. Após este estudo numérico interessa quantificar a vida à fadiga em reflexão de fendas para posterior correlação com a actividade que lhe deu origem, estando esta correlacionada com as características do pavimento existente.

Os ensaios de reflexão de fendas são realizados aplicando ao proвете 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 a 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, correspondendo a 3 vezes a abertura da fenda que se pretende simular.

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. Ao contrário do que acontece nos ensaios em tensão controlada, nos ensaios em extensão controlada, a rotura do provete é convencional, sendo usualmente definida como o número de ciclos de carga que conduzem à redução de 50% da rigidez inicial do provete.

Para o ensaio de fadiga em reflexão de fendas foi definida uma rigidez correspondente à força necessária para aplicar o deslocamento sofrido pelo volume de material de reforço acima da fenda, para cada uma das direcções solicitadas, consideradas em separado.

A rigidez vertical foi definida como a força vertical necessária para produzir o deslocamento vertical imposto no volume de material de reforço acima da fenda, como se apresenta na Equação 1 (Sousa et al, 1996 e Shatnawi, 1996)

$$E_V = \frac{F_V \cdot af}{d_V \cdot b \cdot h} \quad (1)$$

sendo:

- E_V = rigidez correspondente ao deslocamento vertical imposto no provete;
- F_V = força vertical aplicada em cada ciclo;
- d_V = deslocamento imposto em cada ciclo;
- af = abertura da fenda;
- b = diâmetro do provete;
- h = espessura 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 8.

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. Este facto pode ser justificado pelo facto de enquanto o provete não atinge a rotura, o masticue é o responsável pela resistência à fadiga da mistura betuminosa, verificando-se que após a rotura este masticue 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

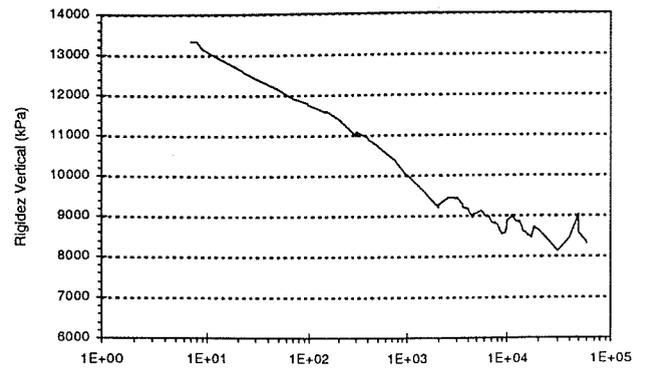


Figura 8 - Evolução logarítmica da rigidez vertical na zona da fenda durante um ensaio de reflexão de fendas

valor percentual que a rigidez apresenta, comparativamente à rigidez inicial, quando se atinge a rotura do provete.

A definição do valor do 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 9, 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 2 para definir esta influência.

$$VFRF = a \cdot AVCR^b \quad (2)$$

sendo:

- $VFRF$ = vida à fadiga em reflexão de fendas;
- $AVCR$ = actividade vertical após reforço em 10^{-6} m;
- a, b = coeficientes determinados experimentalmente

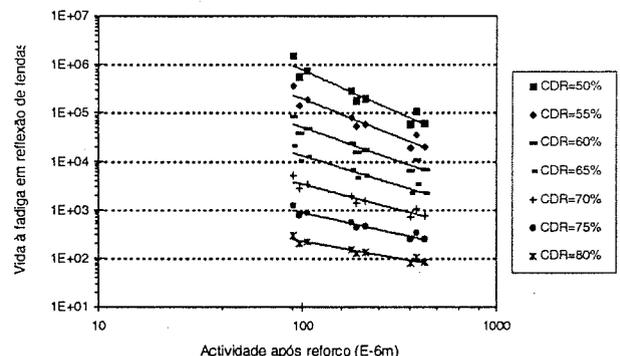


Figura 9 - Influência da actividade após reforço na vida à fadiga em reflexão de fendas transversais

Conhecendo a actividade após reforço para determinada espessura de reforço é possível calcular a vida à fadiga em reflexão de fendas utilizando os resultados anteriores, apresentando-se na Figura 10 a vida à fadiga em reflexão de fendas em função da

espessura de reforço para o caso do reforço de um pavimento.

O dimensionamento de um reforço de pavimento deve ser realizado combinando a vida à fadiga em reflexão de fendas, tanto transversais como longitudinais, com a vida à fadiga por flexão. Um exemplo desta combinação é apresentada na Figura 11, estando a vida à fadiga em reflexão de fendas apresentada para vários valores do coeficiente definidor da rotura (CDR) no ensaio de reflexão de fendas.

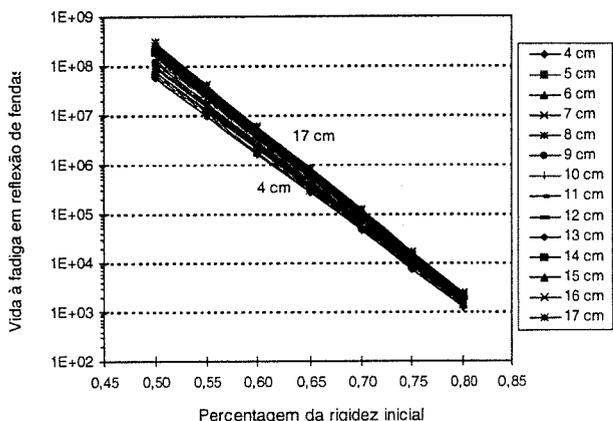


Figura 10 - Vida à fadiga em reflexão de fendas em função da espessura de reforço.

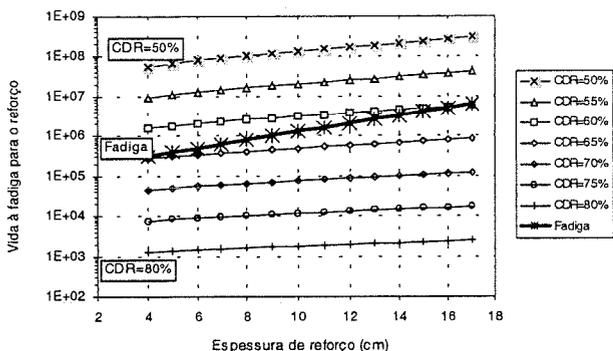


Figura 11 – Vida à fadiga e em reflexão de fendas para o reforço de um pavimento

CONCLUSÕES

Neste capítulo 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 realizado 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 a introdução de um parâmetro designado por **Coeficiente Definidor da Rotura (CDR)** num ensaio de reflexão de fendas,

tendo este coeficiente sido utilizado para o estudo paramétrico dos resultados de reflexão de fendas.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Rigo, J.M., 1993. *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.
- Shatnawi, S.R., 1996. *A Procedure for evaluating reflective cracking*. Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference, Washington, D.C.
- 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.