

SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA INCLUSÃO DE GEOGRELHA COMO SISTEMA ANTI REFLEXÃO DE TRINCAS

DSc. Guillermo E. Montestruque

Huesker Ltda.

DSc. Régis Martins Rodrigues

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Geotecnia

Resumo

A vida de fadiga de um pavimento flexível não deve ser prevista por meio de um modelo que seja função apenas da deformação máxima de tração sob o revestimento asfáltico. A propagação das trincas por fadiga através da espessura da camada asfáltica deve ser considerada. A simulação do caminhamento de uma trinca através da espessura da camada asfáltica pode ser feita pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

O presente trabalho descreve a simulação através do Método dos Elementos Finitos com a finalidade de interpretar resultados obtidos de ensaios dinâmicos de fadiga. O ensaio foi realizado sobre vigas de concreto asfáltico com o objetivo de avaliar o efeito da geogrelha como camada intermediária de reforço. A simulação realizada com a utilização do software MSC.NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) explica o mecanismo observado em laboratório.

Abstract

The fatigue life of a flexible pavement should not be forecasted through a model that considers only the maximum strain under the asphaltic overlay. The crack propagation by fatigue through overlay thickness should be considered. The Finite Element Method (FEM) can simulate the growth of a crack through the asphaltic overlay thickness.

This paper presents a simulation using Finite Element Model in order to understand dynamic behaviour from laboratory study. The tests were conducted on asphalt prismatic beams for evaluation of the effect of a geogrid as an interlayer reinforced system. The simulation using the software MSC.NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) explains the mechanism observed in laboratory.

1 INTRODUÇÃO

A aceitação do sistema de restauração com geogrelhas tem aumentado nos últimos anos e deverá continuar crescendo no futuro. A incorporação de geogrelhas no concreto asfáltico tem trazido benefícios estruturais em obras de pavimentação. Daí a necessidade de se conhecer os mecanismos através dos quais as camadas intermediárias de geogrelha aumentam a vida de serviço com relação à reflexão de trincas de uma camada asfáltica de recapeamento.

Montestruque (2001) realizou ensaios de fadiga em vigas de concreto asfáltico com e sem geogrelha, tendo como apoio uma base elástica. As vigas, de dimensões 75mm x 150mm x 460mm, foram pré-trincadas com aberturas variadas (3, 6, e 9 mm). A geogrelha estudada foi o Hatelit C 40/17 posicionado exatamente sobre a extremidade de uma pré-trinca. O tipo de carregamento foi senoidal com frequência de aplicação de 20 Hz, mudando-se a posição da carga com relação à trinca (flexão/cisalhamento). A carga foi aplicada por equipamento hidráulico através de uma chapa de aço, com dimensões de 40 x 75 mm, gerando as pressões de: Pressão máxima 549 kN/m^2 ($5,6 \text{ kgf/cm}^2$). Entre a chapa de aço e a viga de concreto asfáltico foi instalada uma borracha com a finalidade de minimizar a concentração de tensões relativas à rigidez da chapa de aço e evitar o puncionamento observado em ensaios anteriores. O critério de encerramento do ensaio foi quando as primeiras trincas apareceram na superfície. Uma síntese do ensaio e resultados serão descrita nos itens seguintes.

1.1 Sínteses do ensaio de fadiga

Nas vigas sem geogrelha, após poucos ciclos de aplicação de carga surge a trinca de reflexão. Sua ascensão no Modo de flexão e cisalhante deu-se rapidamente e de forma vertical (Figura 1). A ruptura das vigas para o caso das vigas com pré-abertura de 3mm deu-se ao redor de 80.000 ciclos.

Para o caso das vigas reforçadas com geogrelha, essa ascensão vertical se deu entre 2 a 3 cm para o caso menos severo (abertura da pré-trinca 3 mm) e mais severo respectivamente (abertura da pré-trinca 9 mm). Deste modo, a função de reforço da geogrelha impediu a propagação da trinca de reflexão. Após ciclos

de carregamento, micros fissuras vão surgindo tornando-se cada vez mais visíveis e interligando-se umas com outras, levando à formação de novas trincas de severidade menor espalhadas em um volume maior do concreto asfáltico (Figura 2). Este fato foi observado tanto para a posição da carga em flexão como para a posição cisalhante. Nas vigas com geogrelha o ensaio foi finalizado quando apenas uma trinca de menor severidade alcançará a superfície, isto ocorreu ao redor de 500.000 ciclos de aplicação de carga. Nesse estado, a viga ainda encontra-se em condições de resistir a mais ciclos de carga, no entanto optou-se por esse critério devido à longa duração de cada ensaio, entre 8 a 12 horas.



Figura 1 - Propagação típica das trincas de reflexão nas vigas sem geogrelha. Carga na posição de flexão.

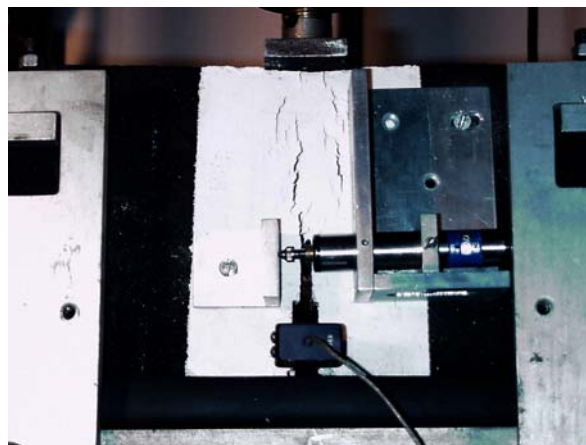


Figura 2 – Bloqueio da trinca de reflexão e formação típica de trincas por fadiga nas vigas com geogrelha. Carga na posição de flexão.

2 SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE LIBERAÇÃO DE NÓS.

Na atualidade existem diversas técnicas e algoritmos implementados com a finalidade de simular a propagação de uma trinca através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Geralmente, corpos de prova de laboratório são moldados ou construídos com simetria. Durante a análise, esta simetria pode ser aproveitada para a redução da malha de elementos finitos. A Figura 3 mostra um esquema de como a dupla simetria pode reduzir à quarta parte a modelagem de uma placa com trinca central. A condição de simetria na linha vertical é mantida durante a análise já que não existe a presença de trinca. A condição simetria na horizontal também existe, a presença da trinca e o estado tensões induzem a uma propagação simétrica na horizontal. Esta condição na análise muda por consequência da liberação seqüencial dos nós quando atingirem alguma condição pré-estabelecida. Esta forma de propagação de trinca é comumente chamada de técnica de liberação de nós (James, 1998).

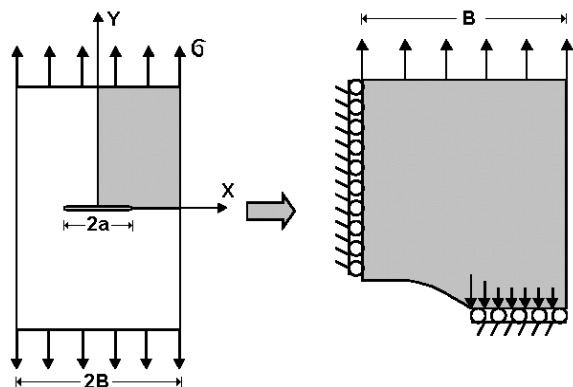


Figura 3 – Esquema que mostra como a simetria geométrica é aproveitada (James, 1998).

2.1 Fundamento Teórico

O Fator de Intensidade de Tensão “K” quantifica a severidade da combinação do comprimento da trinca, do carregamento e da geometria. O comportamento de um dado material pode ser descrito pela relação entre a taxa de crescimento devido ao carregamento cíclico e a variação do Fator de Intensidade de Tensão.

De acordo com a primeira Lei da Termodinâmica, quando um sistema sai de uma condição em que não está em equilíbrio para uma outra, agora de equilíbrio, a energia do sistema decrescerá. Griffith (194?) utilizou esse conceito para a partir de uma equação de balanço de energia, definir que uma trinca pode se iniciar (ou se já existir, pode crescer), somente se a energia total do sistema decrescer ou se mantiver constante.

A taxa de liberação de energia (G) e o fator de intensidade de tensão (K) são dois parâmetros que em sínteses descrevem o comportamento de trincas: G quantifica a variação líquida de energia potencial que acompanha um incremento no comprimento de uma trinca. K quantifica tensões, deformações e deslocamentos na região próxima à ponta da trinca. G é um parâmetro que descreve o comportamento global enquanto K é um parâmetro local. Para materiais elásticos lineares, existe uma única relação entre K e G . Considerando, por exemplo, o caso da placa infinita, contendo uma trinca central perpendicular à direção do carregamento aplicado (Figura 3), G é dado por:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (1)$$

e K é dado por:

$$K = \sigma\beta\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Combinando estas duas equações, obtém-se:

$$G = \frac{K^2}{E}$$

que pode, também, ser expresso por:

$$\frac{\partial U}{\partial a} = \frac{K^2}{E} \Rightarrow K = \sqrt{\frac{\partial U}{\partial a}} E \quad (3)$$

2.2 Validação da Técnica de Liberação de Nós com o Uso do Software MSC/Nastran.

A MacNeal-Schwendler Corporation, fundada em 1963, pesquisa, desenvolve e dá suporte a softwares CAE (Computer Aided Engineering) ligados à modelagem e análise pelo método dos elementos finitos. Participou, junto à NASA (National Aeronautics and Space Administration), do desenvolvimento do

programa NASTRAN (Nasa STRuctural ANalysis), tornando-se cedo proprietária da versão MSC/Nastran.

O programa MSC/Nastran trata-se de um software com “solver fechado”. Antes da modelagem do sistema em estudo é necessário avaliar-se os resultados gerados pelo programa, sendo recomendável partir de uma modelagem mais simples para depois efetuar-se a mais complexa. Neste contexto, verificou-se a obtenção do fator de intensidade de tensão (K) baseado no princípio de energia global mencionado no item 2.1, utilizando a técnica de liberação de nós. Os valores obtidos foram comparados com os teóricos e com outro programa também de procedência da NASA nomeado NASGRO versão 3.0 (Fatigue Crack Growth Computer Program). O NASGRO contém um módulo denominado NASFLA que permite calcular o fator de intensidade de tensão baseado de igual forma nos princípios da mecânica da fratura.

A Figura 3 mostra o esquema do exemplo analisado. Apenas, a quarta parte de uma placa com trinca central foi analisada, desta forma aproveita-se a sua simetria. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 1. Os dados de entrada foram: $2B = 200$ mm; $\sigma = 10$ daN/mm²; $t = 2$ mm; $E = 7200$ daN/mm²; $\nu = 0,3$.

Tabela 1 – Resultados comparativos da obtenção de K através da equação 3 e pela simulação realizada com o software MSC.Nastran.

a	dU/da	K (Nastran)	K (teórico)	e (%)
0	0.201	38.04	39.69	4.34
10	0.655	68.70	69.61	1.33
20	1.160	91.41	92.20	0.86
30	1.766	112.76	113.56	0.71
40	2.550	135.50	136.35	0.63
50	3.658	162.30	163.11	0.50
60	5.405	197.28	197.69	0.21
70	8.628	249.24	248.13	0.45
80	16.57	345.45	338.21	2.10

2.3 Simulação pelo MEF do Ensaio de Fadiga.

A simulação dos ensaios de fadiga através do MEF tem por finalidade esclarecer os mecanismos observados em laboratório. A

malha de elementos finitos utilizada é mostrada na Figura 4. Para representar a geogrelha foi utilizado o elemento de barra “bar”. Para o concreto asfáltico e a base, o elemento de placa “Quad4”. Os módulos teóricos utilizados foram: $E_{CBUQ}=4000MPa$, $E_{Base_elástica}=50 MPa$ ($\nu = 0,3$), e para a geogrelha: $E_{Geogrelha}=45454 MPa$. Nesta análise qualitativa foi considerada uma perfeita união entre os elementos de placa e de barra. O resultado da análise estática é mostrado nas Figuras 5 a ?.

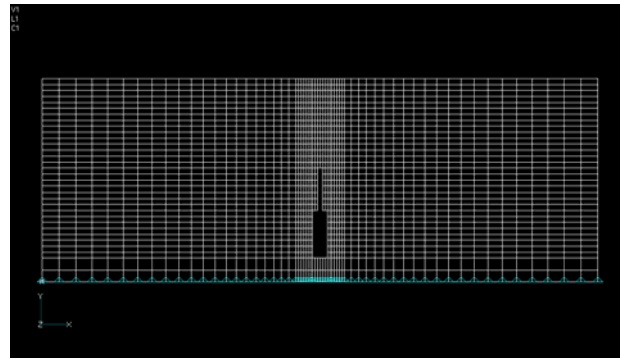


Figura 4 - Malha de elementos finitos adotada.

3 RESULTADOS DA SIMILAÇÃO

Os resultados da simulação mostraram uma drástica redução da concentração de tensões na extremidade da trinca devido à inclusão da geogrelha. A tensão de tração em primeira instância (comprimento de trinca igual a zero, $a=0$), decresce na ordem de 56 %. Isto explica a observação no laboratório referente ao início do trincamento ser retardado devido à inclusão da geogrelha como elemento de reforço.

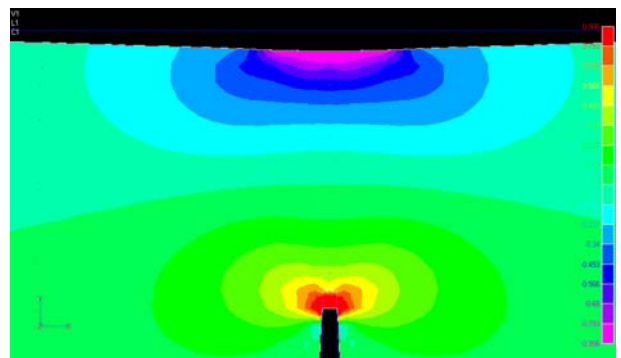


Figura 5 – Estado de tensões das vigas sem geogrelha.

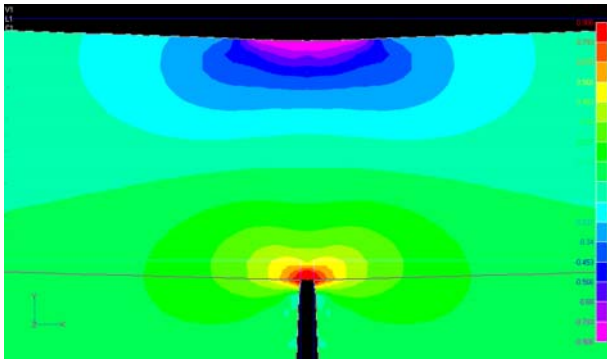


Figura 6 – Estado de tensões das vigas com geogrelha.

Na simulação sem geogrelha, à medida que se libera os nós (simulação da trinca se propagando), a tensão de tração na extremidade da trinca aumenta (Figuras 7 a 9).

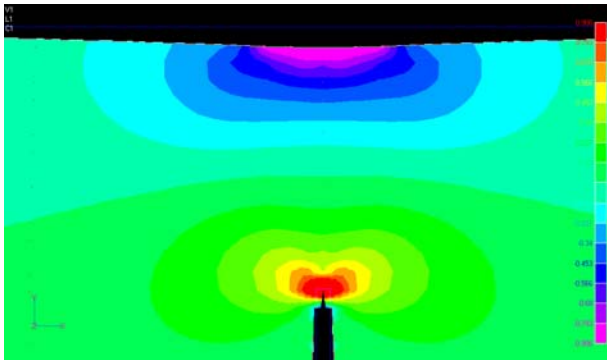


Fig.7-Simulação viga sem geogrelha, a=0,5cm

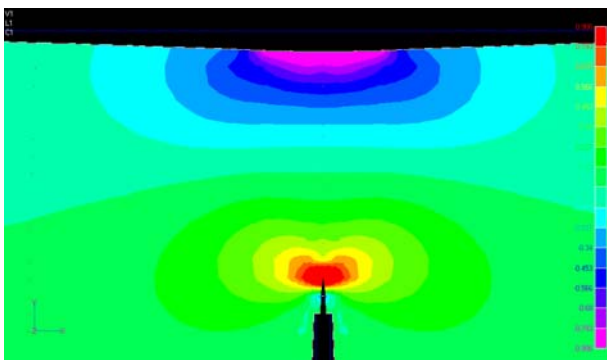


Fig.8-Simulação viga sem geogrelha, a = 1,0cm

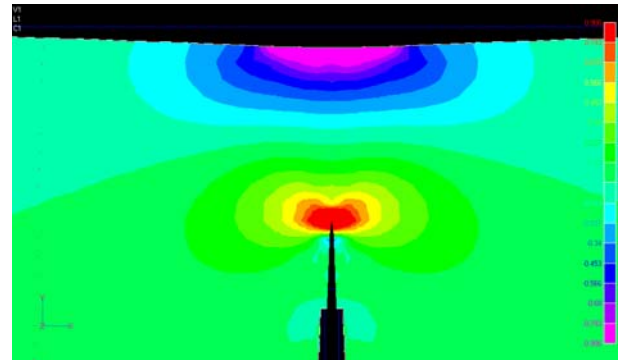


Fig.9-Simulação viga sem geogrelha, a=2,5cm

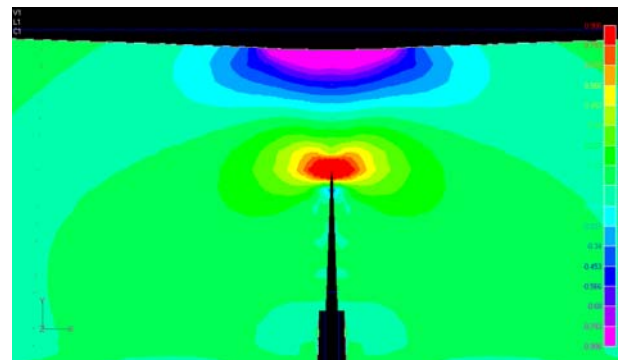


Fig.10-Simulação viga sem geogrelha, a= 4,0cm

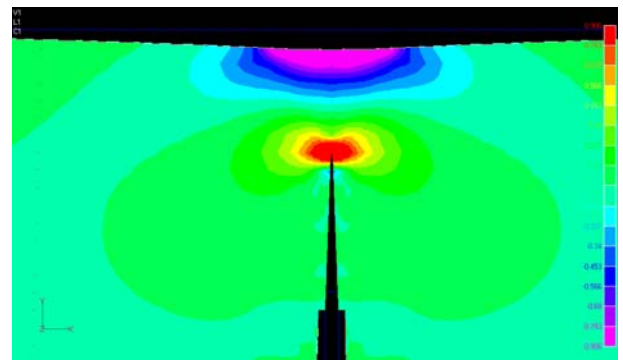


Fig.11-Simulação viga sem geogrelha, a=4,5cm

Na simulação com geogrelha, à medida que se libera os nós (simulação da trinca se propagando), a tensão de tração aumenta no elemento de reforço (geogrelha) reduzindo-se a tensão atuante na extremidade da trinca a valores muito pequenos de tal forma que o elemento que representa a camada asfáltica possa absorver (Figuras 12 a 16). Explica-se, desta forma, o motivo do porque a propagação da trinca de reflexão nas vigas ensaiadas com geogrelha é interrompida. O nível de tensão atuante na extremidade da trinca é suficientemente pequeno para não conseguir romper a coesão que outorga o asfalto entre os agregados do concreto asfáltico.

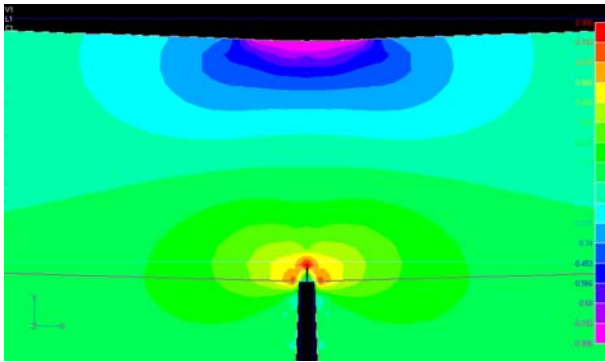


Fig.12-Simulação viga com geogrelha, a=0,5cm

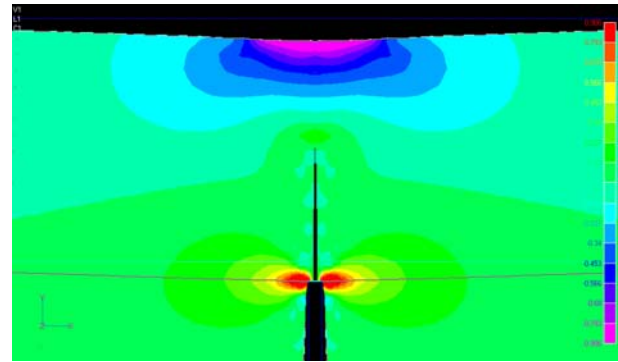


Fig.16-Simulação viga com geogrelha, a=4,5cm

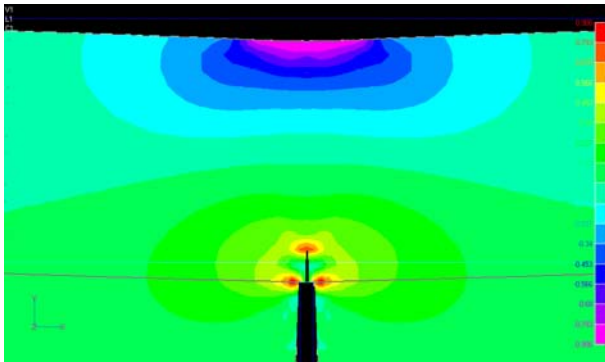


Fig.13-Simulação viga com geogrelha, a=1,0cm

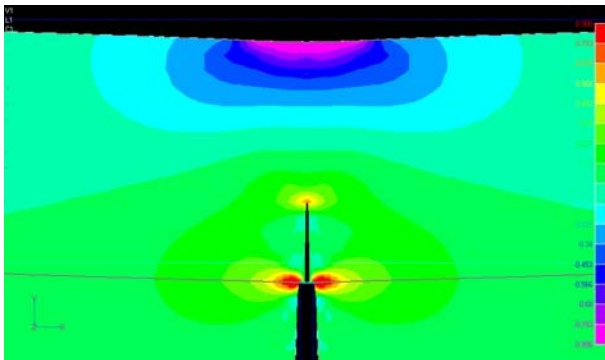


Fig.14-Simulação viga com geogrelha, a=2,5cm

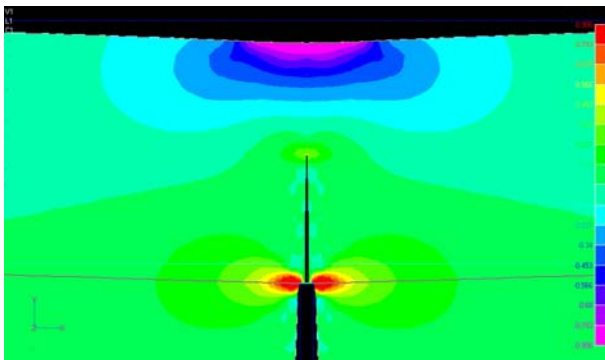


Fig.15-Simulação viga com geogrelha, a=4,0cm

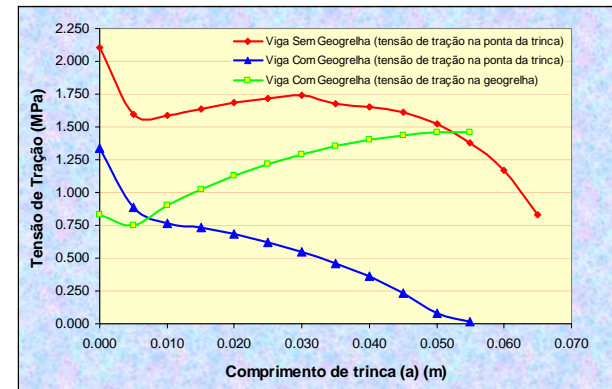


Fig. 17 – Sínteses das tensões de tração obtidas da simulação nas vigas com e sem geogrelha.

A simulação conseguiu esclarecer o padrão de trincamento observado em laboratório. A função de reforço da geogrelha interrompeu a propagação da trinca de reflexão onde parte da carga aplicada é absorvida pela geogrelha. O surgimento das micro-trincas é produto da própria fadiga da massa asfáltica Fig.18. A coerência entre os resultados de laboratório e a simulação é evidenciada através das Figuras 18 e 16.

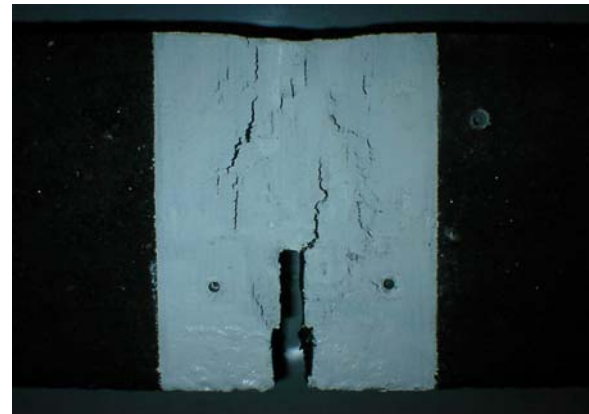


Fig.18-Interrupção da propagação da trinca de reflexão e surgimento de micro trincas por fadiga no concreto asfáltico, Montestruque 2001

Segundo Tschegg (2000), quando existe uma alta qualidade na aderência entre a camada de revestimento asfáltico e a camada intermediária de geogrelha existirá por consequência uma alta resistência à formação de trincas no recapeamento. A Figura 18 ilustra esquematicamente dois casos extremos de propagação de trincas. O primeiro caso, existe uma perfeita aderência (Figura 19.a) e no segundo caso, quando se tem uma baixa aderência (Figura 19.b). Neste último caso, ocorrerá um desacoplamento localizado e, inclusive, é de se esperar uma desagregação da massa asfáltica (Figura 19.b). Esta pesquisa contribuiu a esclarecer com base na simulação que o desacoplamento e desagregação muitas vezes observadas deve-se à concentração de tensões existentes nessa região (Figura 16). A tendência da camada intermediária é desaparecer entre a camada asfáltica se não for o suficientemente resistente aos ciclos de carregamento, este acontecimento não ocorrerá em caso de uma alta aderência. Além disso, as propriedades elásticas da geogrelha (módulo de rigidez) e o comprimento “ ℓ ” de desacoplamento são fatores decisivos no comportamento à fratura da trinca. A rigidez do reforço na área trincada depende fortemente da separação “ ℓ ”, como foi deduzido na equação 4; partindo-se da suposição que a tensão atuante não exceder o limite de proporcionalidade do material, podemos aplicar a Lei de Hooke e escrever:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{EA} \Rightarrow \frac{\Delta COD}{\ell} = \frac{\Delta F}{EA}$$

$$S_{eff} = \frac{\Delta F}{\Delta COD} = \frac{EA}{\ell} \quad (4)$$

onde:

- A = área da seção transversal da geogrelha;
- E = módulo de elasticidade do material;
- F = Força aplicada;
- ℓ = comprimento de desacoplamento;
- COD = Abertura da trinca (“Crack Opening Displacement”).

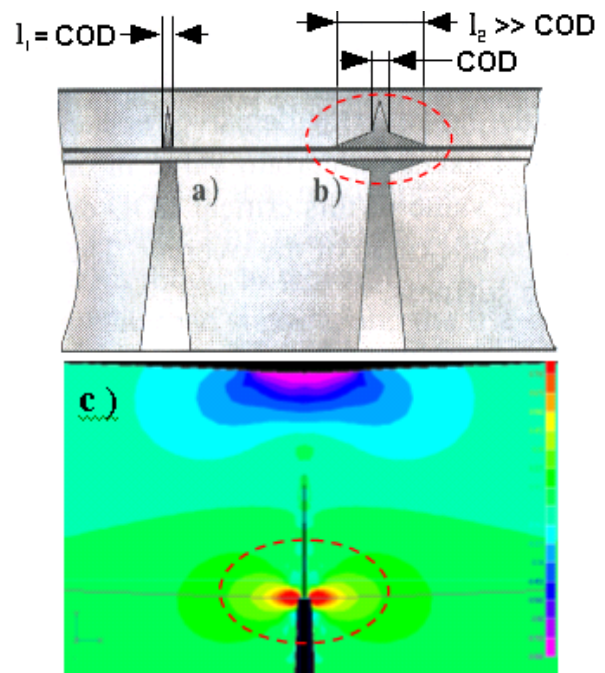


Figura 19 – Esquema da propagação do trincamento na interface da camada intermediária: a)Alta qualidade na aderência; b)Baixa qualidade na aderência (Tschegg,2000) c)Resultado da simulação onde foi considerado perfeita aderência (Montestruque, 2002).

Conclui-se que a aderência entre a geogrelha e a camada asfáltica é um fator muito importante na resistência à propagação da trinca de reflexão. A Rigidez efetiva da geogrelha deve alcançar o valor mais alto possível, além de ter um bom desempenho à fadiga.

CONCLUSÕES

- A simulação esclarece o porque da camada asfáltica de recapeamento tem sua vida de fadiga incrementada pela ação estrutural da geogrelha, ao impedir a formação de uma única trinca de reflexão que monopolize a dissipação de energia em sua extremidade.
- A Aderência entre o concreto asfáltico e o material de reforço é de vital importância para que o material de reforço estrutural introduzido possa cumprir com eficácia a sua função. Os coeficientes de dilatação entre a geogrelha e o concreto asfáltico devem ser compatíveis. As diferenças entre coeficientes de dilatação produzem tensões de cisalhamento secundárias entre o asfalto e o material de reforço causadas pelos

diferentes movimentos de expansão ou contração entre ambos materiais. Portanto, se localmente tais tensões chegam a alcançar a tensão limite de aderência, imediatamente se produzirá uma redução de aderência entre asfalto e o material de reforço. É importante notar que se o reforço deve absorver tensões de tração trabalhando em cooperação com a camada asfáltica, isso só é possível se esse estiver bem ancorado, pois só deve trabalhar, ou mobilizar resistência, se houver estímulo à sua deformação. Esta ancoragem é garantida por uma boa aderência com a camada asfáltica.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- James, A. M. (1998). "A Plane Stress Finite Element Model for Elastic-Plastic Mode I/II Crack Growth. Dissertation of Doctor of Philosophy. Kansas State University.
- Montestruque, G. E. (2002). "Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutico.
- Montestruque, G. E. (2001). "Bloqueo del Agrietamiento por Reflejo con el Uso de Geomalla. XI Congreso Ibero Latino Americano del Asfalto. Lima, Perú.