

Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Infra-Estrutura de Transportes.

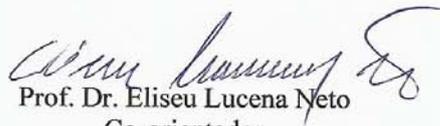
Michela Steluti Poletti

**Interpretação Numérica de Ensaios de Fadiga em Concreto
Asfáltico Reforçado com Geogrelha**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Régis Martins Rodrigues
Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Co-orientador

Prof. Dr. Homero Santiago Maciel
Chefe da Divisão de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP - Brasil
2005

INTERPRETAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIOS DE FADIGA EM CONCRETO ASFÁLTICO REFORÇADO COM GEOGRELHA

Michela Steluti Poleti

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Antônio Hernandes	Presidente – ITA
Prof. Dr. Régis Martins Rodrigues	Orientador – ITA
Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto	Co-orientador - ITA
Prof. Dr. Flávio Luiz da Silva Bussamra	ITA
Prof. Dr ^a Delma de Mattos Vidal	ITA
Prof. Dr ^a Liedi Legi Bariani Bernucci	EPUSP

ITA

*“Dedico este trabalho aos meus pais
Edna e Irineu, às minhas irmãs
Fulvia e Naiara e ao meu amor Rafael.”*

Agradecimentos

A autora deseja expressar seus mais sinceros agradecimentos:

À CAPES pelo suporte financeiro destinado ao desenvolvimento deste estudo.

À empresa Huesker Ltda. pelo apoio bibliográfico e pelo suporte a diversas etapas desta pesquisa.

Ao Prof. Régis pela contribuição na orientação deste trabalho.

Ao Prof. Eliseu pelo auxílio nas análises numéricas com o software MSN/NASTRAN e contribuição na orientação deste trabalho.

“A gente não faz amigos, reconhece-os” (Vinicius de Moraes), por isso um agradecimento especial aos meus grandes amigos: Aloísio, Amanda, Bárbara, Betânia, Catarina, Claudinete, Cláudio, Heloisa, Kelly, Kétnes, Mariana, Mauro, Nathalia, Paula, Renata, Renato, Renée, Viviane e Vinicius.

Aos colegas da pós e a todos os demais pela amizade e companheirismo.

Aos professores e funcionários da Infra, pelo apoio e conhecimentos transmitidos.

Resumo

Esta pesquisa trata da análise numérica pelo método dos elementos finitos de ensaios de fadiga de laboratório realizados em vigas de concreto asfáltico, contando ou não com a presença de camadas intermediárias especiais do tipo geogrelha polimérica, atuando como camadas intermediárias em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas.

Verificou-se que a presença da geogrelha, não afeta de forma significativa o estado de tensões na extremidade da trinca subjacente à camada asfáltica. O seu efeito se dá à medida que a trinca se propaga, nas condições finais. A condição de carregamento usada na análise foi diferente da realizada no ensaio. Na simulação os valores foram obtidos na condição inicial de carregamento e no ensaio na condição final. A idéia inicial era verificar se já na condição inicial de carregamento ocorreria alguma mudança no estado de tensão.

Assim, as comparações realizadas não mostram alterações no estado de tensão na extremidade da trinca subjacente à camada asfáltica.

Abstract

This research deals with the finite element modelling of fatigue tests conducted on asphalt concrete specimens, reinforced or not with polimeric geogrids in anti-reflection cracking systems.

It was concluded that the geogrid insertion, is not capable of changing the state of stress at the crack tip under the asphalt concrete layer. Your effect feels as the crack spreads, in the final conditions. The shipment condition used in the analysis it was different from the accomplished in the rehearsal. In the simulation the values were obtained in the initial condition of shipment and in the rehearsal in the final condition. The initial idea was to verify already in the initial condition of shipment it would happen some change in the state of stress.

Like this, the accomplished comparisons don't show alterations in the state of stress at the crack tip under the asphalt concrete layer.

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1</i>	<i>Mecanismos principais de deterioração de um pavimento asfáltico.</i>	31
<i>Figura 2.2</i>	<i>Geogrelha bidirecional.</i>	45
<i>Figura 3.1</i>	<i>Solicitações Críticas na Extremidade da Trinca.</i>	52
<i>Figura 3.2</i>	<i>Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas (Posição de Flexão).</i>	54
<i>Figura 3.3</i>	<i>Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas (Posição Cisalhante).</i>	54
<i>Figura 3.4</i>	<i>Resumo das curvas de fadiga (Montestruque, 2002).</i>	57
<i>Figura 3.5</i>	<i>Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas – abertura de 3 mm (Posição Flexão).</i>	58
<i>Figura 3.6</i>	<i>Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas – abertura de 6 mm (Posição Flexão).</i>	58
<i>Figura 3.7</i>	<i>Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas – abertura de 9 mm (Posição Flexão).</i>	59
<i>Figura 3.8</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 3mm (Flexão).</i>	62
<i>Figura 3.9</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 3mm (Cisalhante).</i>	62
<i>Figura 3.10</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 6mm (Flexão).</i>	63
<i>Figura 3.11</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 6mm (Cisalhante).</i>	63
<i>Figura 3.12</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 9mm (Flexão).</i>	64
<i>Figura 3.13</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 9mm (Cisalhante).</i>	64
<i>Figura 3.14</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga até a ruptura - abertura da pré-trinca 3mm.</i>	67
<i>Figura 3.15</i>	<i>Resultado do ensaio de fadiga até a ruptura - abertura da pré-trinca 3mm.</i>	67
<i>Figura 3.16</i>	<i>Solicitações críticas para o trincamento em revestimento asfáltico.</i>	69
<i>Figura 4.1</i>	<i>Viga ensaiada por Montestruque (2002).</i>	75
<i>Figura 4.2</i>	<i>Viga sob carga que induz: (a) flexão; (b) cisalhamento.</i>	76
<i>Figura 4.3</i>	<i>Malha adotada para a metade da viga com trinca de 3 mm de abertura.</i>	78
<i>Figura 4.4</i>	<i>Detalhe da geogrelha.</i>	79
<i>Figura 4.5</i>	<i>Densidade de energia de distorção em torno da extremidade da trinca para a pressão de 5,49 kgf/cm² à flexão.</i>	82
<i>Figura 4.6</i>	<i>Densidade de energia de distorção em torno da extremidade da trinca para a abertura de trinca de 3 mm.</i>	85

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Síntese dos Ensaios de Fadiga Realizados com Geogrelha.	51
Tabela 3.2 Fator de Efetividade para a pressão de 549 kN/m ² (carga 1,68 kN).	56
Tabela 3.3 Fator de Efetividade para a pressão de 424,5 kN/m ² (carga 1,3 kN).	56
Tabela 3.4 Fator de Efetividade para a pressão de 326,5 kN/m ² (carga 1,0 kN).	56
Tabela 3.5 Fator de eficiência da geogrelha (FEG) para a pressão de 5,6 kgf/cm ² .	61
Tabela 4.1 Propriedades dos materiais que compõem a viga (Montestruque, 2002).	75
Tabela 4.2 Valores de tensões de vonMises obtidos em pontos da viga.	80
Tabela 4.3 Densidade de energia de distorção (kgf/cm ²) no centro do elemento E ₁ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.	83
Tabela 4.4 Densidade de energia de distorção (kgf/cm ²) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.	84
Tabela 4.5 Densidade de energia de distorção (kgf/cm ²) no centro do elemento E ₂ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.	86
Tabela 4.6 Densidade de energia de distorção (kgf/cm ²) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.	87
Tabela 4.7 Densidade de energia de distorção (kgf/cm ²) no centro do elemento E ₂ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.	88
Tabela 4.8 Densidade de energia de distorção (kgf/cm ²) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.	89
Tabela 4.9 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) no centro do elemento E ₁ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca de 3 mm e geogrelha a 20 mm da extremidade da trinca).	92
Tabela 4.10 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca de 3 mm e geogrelha a 20 mm da extremidade da trinca).	93
Tabela 4.11 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) no centro do elemento E ₂ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (pressão: 5,49 kgf/cm ² ; geogrelha exatamente na extremidade da trinca).	93
Tabela 4.12 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (pressão: 5,49 kgf/cm ² ; geogrelha exatamente na extremidade da trinca).	94

Tabela 4.13 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) no centro do elemento E_2 e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca: 3 mm; geogrelha exatamente na extremidade da trinca; pressão: 5,49 kgf/cm²). 94

Tabela 4.14 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca: 3 mm; geogrelha exatamente na extremidade da trinca; pressão: 5,49 kgf/cm²). 95

Tabela 4.15 Valores das deformações no centro do elemento E_2 e deformações medidas no início do ensaio (pressão: 5,49 kgf/cm²; geogrelha exatamente na extremidade da trinca). 96

Lista de Abreviaturas e Siglas

CALTRANS: *California Transportation Department*

CAM: *Crack Activity Meter*

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

FEG: Fator de Efetividade da Goegrelha

Pavesys 8.0: Programa de computador que permite verificar o desempenho de projetos de pavimentos rodoviários e aeroportuários quanto aos principais defeitos, através de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico.

MSC/NASTRAN: Software de Elementos Finitos

MTS: *Materials Testing System*

MEF: Método dos Elementos Finitos

NBR: Norma Brasileira

PEAD: Polietileno de Alta Densidade

PET: Poliéster

PP: Polipropileno

SGP: Sistema de Gerência de Pavimentos

Lista de Símbolos

- D_0** : deflexão do pavimento (em mils)
- E_2** : módulo de elasticidade da camada de base
- E_3** : módulo de elasticidade da camada do subleito
- ϵ_t** : deformação máxima de tração atuante na camada asfáltica
- ν** : coeficiente de Poisson
- G** : módulo cisalhante
- h** : espessura da camada asfáltica (em pol)
- N** : número de ciclos de carga
- $N_{f(i)}$** : vida de fadiga estimada pelo modelo i
- N_c** : nível de confiabilidade
- N_0** : vida de reflexão de trincas em cada subcamada
- N_f** : vida de fadiga, em ciclos de carga
- $N_{f(B)}$** : vida de fadiga da viga com a carga na posição de flexão
- $N_{f(S)}$** : vida de fadiga da viga com a carga na posição cisalhante
- U_d** : densidade de energia de distorção
- c_f** : consumo à fadiga
- ρ** : constante dependente da estrutura do pavimento, rigidez do subleito, magnitude da carga atuante e do clima
- σ_x** : tensão na direção x
- σ_y** : tensão na direção y
- σ_z** : tensão na direção z
- σ_1** : tensão principal
- σ_2** : tensão principal
- σ_3** : tensão principal
- t_1** : espessura do concreto asfáltico
- t_2** : espessura do concreto asfáltico trincado
- t_3** : espessura da borracha
- t_4** : posição da geogrelha a 20 mm da trinca
- d_1** : distância da geogrelha à extremidade da trinca
- d_2** : abertura da trinca

Sumário

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	14
1.2 OBJETIVO	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS	20
2.2.1 <i>Tipos de Avaliação</i>	20
2.2.2 <i>Avaliação Estrutural de Pavimentos</i>	23
2.3 A MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DOS PAVIMENTOS	24
2.3.1 <i>Manutenção</i>	24
2.3.2 <i>Restauração</i>	26
2.4 O DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS	28
2.4.1 <i>Introdução</i>	28
2.4.2 <i>A Deterioração dos Pavimentos</i>	29
2.4.3 <i>Diagnóstico do Desempenho do Pavimento</i>	34
2.5 O TRINCAMENTO POR REFLEXÃO	35
2.6 MATERIAIS DE REFORÇO	41
2.6.1 <i>Introdução</i>	41
2.6.2 <i>Geogrelhas poliméricas</i>	44

3.	ENSAIOS DE FADIGA	48
3.1	INTRODUÇÃO	48
3.2	ESTRUTURA DOS ENSAIOS	51
3.2.1	<i>Introdução</i>	51
3.2.2	<i>Primeira Etapa</i>	52
3.2.3	<i>Segunda Etapa</i>	57
3.2.4	<i>Terceira Etapa</i>	65
3.3	CONCLUSÕES DOS ENSAIOS DE FADIGA	68
3.3.1	<i>Modelo Mecânico para Projeto de Restauração de Pavimentos</i>	68
3.3.2	<i>Vida de fadiga</i>	71
3.4	UTILIZAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA	72
4.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	74
4.1	GEOMETRIA DA VIGA E MATERIAL UTILIZADO	74
4.2	MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS	75
4.3	TESTE DE CONVERGÊNCIA	80
4.4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	81
4.4.1	<i>Primeira Etapa (trinca: 3 mm; geogrelha a 20 mm da extremidade da trinca)</i>	81
4.4.2	<i>Segunda Etapa (pressão: 5,49 kgf/cm²; geogrelha exatamente na extremidade da trinca)</i>	85
4.4.3	<i>Terceira Etapa (trinca: 3 mm; geogrelha exatamente na extremidade da trinca; pressão: 5,49 kgf/cm²)</i>	88
4.5	RELAÇÃO ENTRE U_D E N_F	90
4.5.1	<i>Introdução</i>	90
4.5.2	<i>Primeira Etapa</i>	92
4.5.3	<i>Segunda Etapa</i>	93
4.5.4	<i>Terceira Etapa</i>	94
4.6	VALIDAÇÃO COM VALORES DE DEFORMAÇÕES	95
5.	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	APÊNDICE I	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da Pesquisa

O trincamento por fadiga das camadas asfálticas de revestimento é o principal mecanismo que leva à deterioração dos pavimentos flexíveis rodoviários.

O trincamento dos revestimentos asfálticos pode ser classificado, segundo Freitas (2002), em três tipos: (1) trincamento por fadiga, devido à ação repetitiva do tráfego; (2) trincamento por reflexão, proveniente de possíveis defeitos de camadas subjacentes ao revestimento; e (3) trincamento a baixa temperatura, devido à queda brusca de temperatura. Em virtude das condições climáticas brasileiras, estruturais e de tráfego, os dois primeiros tipos de trincamento ocorrem no Brasil com maior frequência, e, por esse motivo, despertam mais interesse nas investigações no país.

Segundo Rodrigues (2000b), o trincamento por fadiga é o fenômeno da fratura que ocorre sob tensões repetidas ou oscilantes no tempo, tensões estas que têm amplitude menor que a resistência do material. Pode ocorrer em tração ou cisalhamento. O número de repetições de uma certa carga de eixo que levará um revestimento asfáltico a manifestar as

trincas de fadiga depende das propriedades de fadiga do concreto asfáltico e das propriedades de deformação *in situ* da seção do pavimento.

O trincamento por reflexão de nada difere do processo de trincamento normal por fadiga de um revestimento asfáltico, na medida em que se trata apenas do crescimento e interligação de microfissuras inerentes à massa asfáltica devido à repetição de ciclos de carga-descarga (Rodrigues, 2003).

Com a evolução da tecnologia aplicada à engenharia de pavimentos, tem se buscado estabelecer estudos de sistemas de restauração de pavimentos que possam minimizar ou retardar a ocorrência dos principais mecanismos de degradação que contribuem para a queda de serventia ao longo do tempo. É, portanto, justificável um trabalho que busque melhor compreensão do mecanismo de trincamento em pavimentos flexíveis.

Com o objetivo de contribuir para um melhor entendimento do mecanismo de trincamento por fadiga em revestimentos asfálticos e os principais fatores que controlam sua ocorrência, o presente trabalho propõe um estudo do efeito do sistema de restauração de pavimento com o uso de geogrelha polimérica. Trata-se de um estudo da geogrelha como camada intermediária de reforço atuando em Sistema Anti-Reflexão de Trincas onde serão interpretados, com base na simulação pelo método dos elementos finitos (software MSC/NASTRAN), os resultados dos ensaios de laboratório (fadiga no MTS) realizados por Montestruque (2002).

A aceitação do sistema de restauração de pavimentos com o uso de geogrelhas tem aumentado nos últimos anos e deverá continuar crescendo no futuro. No Brasil tem sido aplicado em diversas obras: Rodovia BR-232 (PE), SP-330, Anel viário de Campinas (SP), Avenida Brasil (RJ), entre outras. A incorporação de geogrelhas no concreto asfáltico tem trazido benefícios estruturais em obras de pavimentação. Daí a necessidade de se conhecer os mecanismos pelos quais as camadas intermediárias de reforço aumentam a vida de serviço

com relação à reflexão de trincas de uma camada asfáltica de recapeamento (Montestruque, 2002).

A presença do reforço em camadas asfálticas trincadas incrementa o entrosamento de agregados entre as paredes da trinca, contribuindo para resistir melhor aos deslocamentos das extremidades da trinca.

Na pesquisa de Montestruque (2002), com a finalidade de fazer uma análise qualitativa e quantitativa das vigas com geogrelha, foram realizadas três etapas de ensaios dinâmicos de fadiga em vigas de concreto asfáltico com e sem a presença de reforço. A primeira etapa de ensaios foi realizada com a posição da geogrelha a 20 mm sobre a extremidade de uma trinca pré-formada de 3 mm. O critério adotado para encerramento do ensaio foi quando a viga tivesse atingido uma deformação plástica de 2,5 mm. A segunda etapa de ensaios foi executada com a posição da geogrelha exatamente sobre a extremidade de uma trinca pré-formada com aberturas variadas (3, 6 e 9 mm), e teve critério de finalização de ensaio quando as primeiras trincas apareceram na superfície. A terceira etapa de ensaios teve a posição da geogrelha igual à anterior, com a diferença de que a finalização do ensaio deu-se com a ruptura da viga.

Foram obtidos resultados de ensaios que mostraram que o uso de uma geogrelha como camada intermediária de reforço posicionada na extremidade da trinca aumenta a vida do concreto asfáltico situado sobre a trinca, quando comparado com seu similar sem reforço e o Fator de Efetividade da Geogrelha obtido praticamente independe da carga aplicada.

O estudo de sistema de reforço em pavimento asfáltico apresenta um campo com evidente necessidade de pesquisas com o objetivo de viabilizar a utilização de novos sistemas de restauração, capazes de tornar os pavimentos mais seguros, confortáveis e econômicos aos usuários, mediante redução ou retardamento do aparecimento de defeitos, particularmente as trincas por fadiga do revestimento, o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e

as trincas por contração de origem térmica. No presente estudo é discutida e apresentada a simulação dos ensaios de fadiga de vigas de concreto asfáltico oriundas de pesquisas de Montestruque (2002).

O problema mais comum quando um recapeamento simples de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente) é construído sobre um pavimento trincado é a reflexão ou propagação das trincas das camadas antigas para as novas, o que se apresenta após ciclos de carregamento, onde pequenas espessuras de concreto asfáltico não resistem à rápida propagação das trincas que, por conseguinte, reduzem a vida útil do pavimento. Além disso, o aumento da espessura para atrasar a ascensão da trinca pode tornar-se economicamente ineficaz, principalmente quando o potencial para ocorrência da reflexão de trincas em camadas asfálticas de recapeamento for elevado. A reflexão de trincas tende a controlar o desempenho do pavimento restaurado, comprometendo a sua vida de serviço e levando a vidas extremamente curtas. Um Sistema Anti-Reflexão de Trincas deve ser então concebido, definindo-se a natureza dos materiais e as espessuras das camadas constituintes. Dentre as alternativas existentes destaca-se a incorporação da geogrelha polimérica, colocada entre a camada de recapeamento e o pavimento trincado.

Os efeitos de algumas técnicas contra a reflexão de trincas, tanto nas análises fenomenológicas como na derivação de parâmetros que possam ser utilizados no dimensionamento, vêm sendo abordados por investigações experimentais em laboratório. A vida de fadiga pode ser avaliada em laboratório utilizando ensaios de cargas repetidas, podendo ser realizados tanto à compressão diametral em corpos de prova cilíndricos como em corpos de prova prismáticos bi-apoiados com uma carga central.

O problema a ser investigado nesta pesquisa é, por meio da simulação dos ensaios de fadiga realizados por Montestruque (2002), interpretar os efeitos da presença da camada intermediária em termos de alteração do estado de tensão na camada asfáltica de

recapeamento. Vinte e duas configurações de uma viga ensaiada foram simuladas, com e sem a presença de reforço em vigas de pré-trincas com três aberturas (3, 6 e 9 mm). Esses modelos foram analisados estaticamente. A ferramenta utilizada na análise foi o software de elementos finitos MSC/NASTRAN. Assim, a simulação do efeito do reforço na distribuição interna de tensões foi investigada. O reforço utilizado foi a geogrelha polimérica Hatelit[®]C.

1.2 Objetivo

Dada a importância de se obter uma compreensão melhor do trincamento por reflexão em camadas asfálticas reforçadas, o presente estudo tem como objetivo analisar as alterações do estado de tensões na camada asfáltica de recapeamento na presença da geogrelha polimérica, visando obter elementos que auxiliem metodologias racionais para o dimensionamento estrutural de pavimentos reforçados com geogrelhas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

No *Capítulo 1*, como já foi visto, há uma introdução sobre o tema abordado por esta pesquisa e a motivação para a elaboração da mesma, o objetivo e a forma como este trabalho está estruturado.

O *Capítulo 2* contém uma explanação de conceitos relevantes ao comportamento de uma estrutura de pavimento, desde os mecanismos responsáveis pela degradação nos pavimentos das rodovias, enfatizando o trincamento por reflexão, até as medidas de controle adequadas. Realizou-se uma descrição da utilização da geogrelha polimérica de reforço,

através da forma de utilização, processo de instalação e propriedades relevantes dos materiais para reforço de revestimentos asfálticos.

O *Capítulo 3* apresenta um estudo exploratório já realizado, em laboratório, dos efeitos na vida de fadiga de vigotas prismáticas de concreto asfáltico reforçadas com geogrelha. Utilizaram-se ensaios de flexão alternada de cargas repetidas para esta análise (Montestruque, 2002). Expôs-se ainda a análise dos resultados dos ensaios e a forma como os mesmos foram utilizados nesta pesquisa.

No *Capítulo 4* apresentam-se as propriedades dos materiais, os modelos de elementos finitos e os resultados numéricos obtidos para as vigas ensaiadas por Montestruque (2002).

Finalmente, o *Capítulo 5* é composto pelas conclusões do trabalho sendo expostos os pontos fundamentais da pesquisa.

No *Apêndice A* é apresentado um exemplo do roteiro da simulação.

2. RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

2.1 Introdução

Este capítulo contém uma explanação de conceitos relevantes ao comportamento de uma estrutura de pavimento, desde os mecanismos responsáveis pela degradação dos pavimentos das rodovias, enfatizando o trincamento por reflexão, até as medidas de controle adequadas. Realizou-se uma descrição da utilização da geogrelha polimérica de reforço, através da forma de utilização, processo de instalação e propriedades relevantes dos materiais para reforço de revestimentos asfálticos.

2.2 Avaliação de Pavimentos

2.2.1 Tipos de Avaliação

Normalmente no decorrer da vida de serviço de um pavimento ocorre o surgimento de trincas na superfície. Esses defeitos podem ser gerados pelo envelhecimento do revestimento

asfáltico (desagregação, trincas superficiais), falta de resistência à deformação da estrutura (afundamentos plásticos), efeitos ambientais (exemplificadas por trincas transversais) ou podem resultar da falta de capacidade de suporte da estrutura (trincamento por fadiga) (Molenaar, 1993).

Quando esses defeitos atingem certa severidade e extensão, deve-se intervir no pavimento de forma a restabelecer as condições de serviço. Para selecionar a estratégia de manutenção mais apropriada, uma avaliação detalhada das condições da estrutura do pavimento precisa ser realizada. Esta avaliação pode explicar as razões para o desenvolvimento dos defeitos observados.

A avaliação de pavimentos consiste numa série de atividades que fornecem informações sobre o seu estado de conservação atual, particularmente no que diz respeito às condições estruturais do pavimento e da capacidade de oferecer aos seus usuários conforto e segurança durante o tráfego de veículos. Estas informações são utilizadas no planejamento e projeto de serviços de gerência de pavimentos, norteando os serviços de manutenção e restauração da rodovia (Haas *et al.*, 1994).

A avaliação de pavimentos deve ter como principal objetivo fornecer dados para a execução acertada de intervenções corretivas na sua estrutura, quando se fizer necessário, promovendo o restabelecimento das características de conforto, segurança e economia aos usuários das rodovias, independente de quais atividades seja efetuada para proporcionar tal estado, podendo variar entre simples operações de manutenção corretiva até a situação mais extrema, que seria a reconstrução total do pavimento. O conjunto de medidas a serem tomadas é função do conhecimento do estado em que o pavimento se encontra. Este diagnóstico é realizado com base em uma série de parâmetros que definem o comportamento do pavimento (Gontijo *et al.*, 1994).

Dessa forma, são feitas inspeções de campo, onde são avaliadas as condições funcionais ou estruturais, o que possibilita a identificação de quais medidas tomar para que o pavimento apresente condições satisfatórias de uso ao longo de um determinado período pré - estabelecido.

Segundo o DNER (1983), a avaliação de pavimentos pode basicamente ser dividida em dois tipos: a avaliação funcional e a avaliação estrutural.

A avaliação funcional se refere ao conforto ao rolamento, à segurança, custo do usuário das vias, influências do meio ambiente e aspectos estéticos. São realizadas medições de irregularidade superficiais, de resistência à derrapagem, além de contagem de defeitos que aparecem na superfície de rolamento (Medina *et al.*, 1994).

A avaliação estrutural é realizada para se conhecer as características das várias camadas que compõem o pavimento, quanto à sua resistência e deformabilidade sob a ação do tráfego, que são função das propriedades dos materiais e das espessuras das camadas (Medina *et al.*, 1994).

As avaliações funcionais, que consistem na caracterização da degradação superficial e de deformação permanente, traduzem as condições de conforto e segurança do usuário. Objetivam a definição da “natureza” e o “tipo” dos serviços corretivos a serem realizados. Já as avaliações estruturais possibilitam a determinação dos mecanismos que, provavelmente, promoveram a destruição parcial ou total da estrutura do pavimento. Define de forma quantitativa a “magnitude” dos serviços necessários ao restabelecimento da condição de capacidade de carga do pavimento. Visando se ter uma avaliação completa do estado que o pavimento se encontra, é de fundamental importância o conhecimento dos parâmetros que definem cada grupo de avaliações observadas (DNER, 1979a; DNER, 1979b).

2.2.2 Avaliação Estrutural de Pavimentos

É conhecido como avaliação estrutural de pavimentos o conjunto de procedimentos que determinam as respostas da estrutura quando sujeita às cargas do tráfego, traduzida na forma de tensão, deformações e deflexões em determinados pontos do pavimento, de forma que seja possível verificar sua capacidade de resistir aos mecanismos responsáveis pela degradação do pavimento. A partir deste diagnóstico, torna-se possível definir quais serviços serão necessários ao restabelecimento das condições admissíveis aos usuários da rodovia (Rodrigues, 1995).

Esta avaliação se faz necessária quando os mecanismos de degradação dos pavimentos são de natureza estrutural, provocada pela repetição das cargas do tráfego, seja por trincamento por fadiga, reflexão de trincas ou acúmulo de deformações permanentes, entre outras.

Segundo Cardoso (1995), a avaliação estrutural de pavimentos é função de dois fatores:

1. Dos métodos a serem utilizados;
2. Da experiência do avaliador, que aumenta a cada trabalho realizado, sendo fruto da vivência.

A tomada de decisões viáveis, confiáveis e econômicas depende de uma avaliação fundamentada em conceitos bem aplicados, sendo possível assim à previsão do comportamento da estrutura do pavimento quando sob a ação do tráfego. Neste contexto, torna-se de extrema importância a presença de um profissional qualificado no processo de avaliação estrutural de um pavimento (Pitta e Balbo, 1998).

2.3 A Manutenção e Restauração dos Pavimentos

2.3.1 Manutenção

Todas as estruturas sofrem um processo gradual de deterioração de seus componentes físicos, resultando em redução de sua serventia (perda de funcionalidade) ao longo do tempo. Este processo é acionado pela ação repetida das cargas de serviço, das intempéries e pelas alterações físicas e químicas naturais dos materiais, sendo controlado pela especificação dos materiais, pelo dimensionamento estrutural e pela própria concepção da estrutura.

Nos pavimentos, as velocidades de deterioração tendem a ser maiores que nas demais estruturas, em vista de sua grande exposição aos agentes climáticos e ao seu modo de utilização pelas cargas do tráfego. Sendo assim, não é suficiente construir-se um pavimento de forma adequada e ignorarem-se as conseqüências econômicas e funcionais de seu desempenho a médio (5-10 anos) e longo prazos (15-20 anos). Além disso, a melhor ou pior condição em que um pavimento se encontre afeta não apenas os custos diretamente envolvidos com a pavimentação, mas também todas as parcelas do custo total do transporte (custos operacionais dos veículos, acidentes, atrasos, deterioração dos veículos, interrupções do tráfego provocadas por intervenções no pavimento). É fundamental, dessa forma, que a manutenção do pavimento seja feita no momento certo e utilizando técnicas adequadas.

A restauração de um pavimento é o processo de se trazer a sua condição funcional a níveis aceitáveis por meio de intervenções que sejam técnica e economicamente adequadas e eficazes, o que implica que a durabilidade e o desempenho da solução implementada devam atender a requisitos mínimos, além de levarem a um retorno máximo do investimento realizado, dentro das restrições técnicas e operacionais existentes. Os objetivos específicos a serem atingidos quando se projeta à restauração de um pavimento são os seguintes:

- Trazer a condição funcional (conforto ao rolamento e segurança) a níveis compatíveis com a de um pavimento novo;
- Garantir uma vida de serviço mínima para o pavimento restaurado, de modo a que uma nova intervenção desse mesmo porte seja requerida apenas após este período;
- Utilizar técnicas disponíveis e aplicáveis, e que atendam a requisitos operacionais e às restrições orçamentárias;
- Controlar os mecanismos pelos quais a deterioração das estruturas de pavimento vem se processando ao longo do tempo (trincamento por fadiga das camadas asfálticas e cimentadas, afundamentos plásticos por acúmulo de deformações permanentes em todas as camadas, drenagem sub-superficial deficiente, consolidação de solos moles sob cargas estáticas e repetidas, densificação sob cargas repetidas de camadas com deficiência de compactação, materiais com problemas construtivos).

Basicamente, a restauração difere de uma Conserva Pesada porque, nesta última, os custos são bem menores, não há a preocupação de se obter uma vida de serviço significativa pré-estabelecida e nem a de se trazer a condição funcional a de um pavimento novo, mas apenas a de se corrigir algumas deficiências funcionais e/ou se proteger o pavimento existente, estendendo sua vida de serviço.

A decisão de se restaurar um pavimento pode ser tomada a partir de uma série de parâmetros indicativos, tais como: custos de conservação elevados, necessidade muito freqüente de intervenções, irregularidade elevada e degradação de superfície acentuada. Um dos benefícios que vêm sendo obtidos com a aplicação de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) em todo o mundo é a determinação do momento mais eficaz, em termos econômicos, para se executar a restauração dos pavimentos de uma rede viária.

As necessidades futuras de manutenção de um componente ou estrutura deveriam, idealmente, ser estimadas da melhor forma possível já durante o projeto original, dentro do horizonte de tempo definido pela vida de serviço da estrutura a ser projetada, a fim de se procurar adotar a solução de projeto que seja a mais econômica em longo prazo. A praticidade de execução da manutenção futura deve ser também levada em conta no projeto, na medida em que um engenheiro responsável pela manutenção ou reparo de um pavimento tem muito menos liberdade de escolha de opções do que o engenheiro que fez o projeto original. Ele deve atuar sobre o pavimento como se apresenta e sujeito a restrições operacionais e econômicas. Além disso, a escolha da medida correta depende de uma compreensão adequada do comportamento do pavimento, a fim de diagnosticar as causas para o desenvolvimento dos defeitos existentes.

2.3.2 Restauração

Os seguintes fatores e aspectos devem ser levados em conta ao se efetuar o projeto de restauração dos pavimentos de uma rodovia ou aeroporto:

1. Período de projeto, ou vida de serviço que o pavimento restaurado deverá apresentar;
2. Deficiências funcionais a serem corrigidas;
3. Na hipótese de aproveitamento do pavimento existente, quais aspectos de degradação estrutural devem ser corrigidos ou estão comprometendo o seu desempenho futuro (drenagem, trincamento de camadas asfálticas e cimentadas, bombeamento de finos, instabilidade ou resistência inadequada de materiais);
4. Qual é a adequação da estrutura existente às solicitações que serão impostas pelas cargas do tráfego de projeto?

5. As características de severidade e extensão da degradação de superfície, na medida em que os defeitos existentes dão origem ou aceleram a geração de outros defeitos, além de aumentarem de severidade com o tempo. No caso de trincas, por permitirem a entrada de água no pavimento, pode-se chegar a uma degradação da condição estrutural das camadas subjacentes, além de comprometerem o desempenho de camadas de recapeamento a serem eventualmente aplicadas, através do fenômeno da reflexão de trincas;
6. Nível de Confiabilidade (N_c) requerido para o projeto, o qual é função da importância da rodovia. Quanto maior for N_c , menores serão os custos e a frequência das operações de conserva;
7. Práticas construtivas vigentes, equipamentos disponíveis e experiência e habilidade das construtoras para execução das diversas soluções a serem concebidas;
8. Tráfego atuante durante o período de projeto (magnitude e frequência das cargas de eixo);
9. Restrições orçamentárias e operacionais;
10. Materiais de construção disponíveis a distâncias de transporte economicamente competitivas;
11. Condições climáticas do local e sua influência na deterioração do pavimento existente.

Além desses fatores, que se referem à condição atual do pavimento existente e a parâmetros a serem fixados para projeto, é fundamental elaborar-se um diagnóstico tão perfeito quanto possível dos problemas exteriorizados pelo pavimento, o qual deve consistir de um esclarecimento quanto aos mecanismos através dos quais a deterioração do pavimento vem se processando ao longo do tempo. Tal diagnóstico só pode ser obtido a partir da análise conjunta e sintética dos seguintes elementos, que devem ser levantados de forma tão confiável quanto for possível:

- Histórico de tráfego, desde a construção ou última restauração;

- Histórico de manutenção do pavimento, incluindo as medidas de conservação e de restauração aplicadas, se possível, e com registros disponíveis quanto ao seu desempenho;
- Informações quanto a problemas construtivos encontrados durante a implantação do pavimento.

2.4 O Desempenho dos Pavimentos

2.4.1 Introdução

Desempenho é um termo genérico que é utilizado para designar como os pavimentos mudam de condição ou servem sua função com o uso ao longo do tempo, isto é, é a variação da serventia com o decorrer do tempo.

Segundo Rodrigues (2000a), o desempenho que um determinado pavimento irá apresentar depende de uma complexa rede de fatores, cujos efeitos interagem uns com os outros, sendo que os mais importantes são:

- A repetição de cargas do tráfego, responsável pela geração e propagação dos defeitos de natureza estrutural, como trincas e afundamentos plásticos;
- A abrasão da superfície do pavimento, gerada pela passagem das rodas de todos os veículos que compõem o tráfego;
- O envelhecimento das camadas asfálticas, provocado pela oxidação do ligante betuminoso e que é agravada pelas condições adversas de temperatura, insolação e pluviosidade, com seus ciclos naturais;
- As propriedades dos materiais utilizados na construção do pavimento e a sua heterogeneidade ao longo da via;

- As condições de drenagem superficial, sub-superficial e profunda;
- A frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo;
- A estrutura do pavimento existente.

2.4.2 A Deterioração dos Pavimentos

Os mecanismos que controlam a deterioração estrutural dos pavimentos dependem do tipo de estrutura, especialmente dentro das seguintes categorias:

- 1) Asfálticos flexíveis;
- 2) Semi-rígido;
- 3) Rígidos;
- 4) Restaurados por meio de recapeamento asfáltico.

Os pavimentos flexíveis se deterioram por meio de:

- Formação e crescimento de trincas nas camadas asfálticas do revestimento, decorrentes da fadiga provocada pela repetição das cargas de tráfego;
- Geração de afundamentos em trilha de roda ou de ondulações na superfície em decorrência do acúmulo de deformações plásticas, sob a ação das cargas de tráfego;
- Desgaste com exposição dos agregados e perda da macrotextura da superfície do pavimento, em decorrência da abrasão provocada pelos veículos, mesmo leves, acelerando pelo intemperismo (oxidação do asfalto), levando à queda do coeficiente de atrito;
- Envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação, que fragiliza a mistura asfáltica e facilita seu trincamento e o arrancamento de agregados;

- Se a camada de base é de drenagem lenta, a formação de trincas no revestimento dá acesso às águas pluviais, que se acumulam no topo da base. Com a passagem de uma carga de roda, gera-se um excesso de pressões neutras na água retida, levando ao bombeamento de finos da base para a superfície (erosão) e a solicitações dinâmicas elevadas sob a camada de revestimento acelerando a sua deterioração. Se a água atingir e se acumular no topo do subleito, não sendo este drenante, aumenta a geração de deformações plásticas nesta camada e a sua intrusão na base granular.

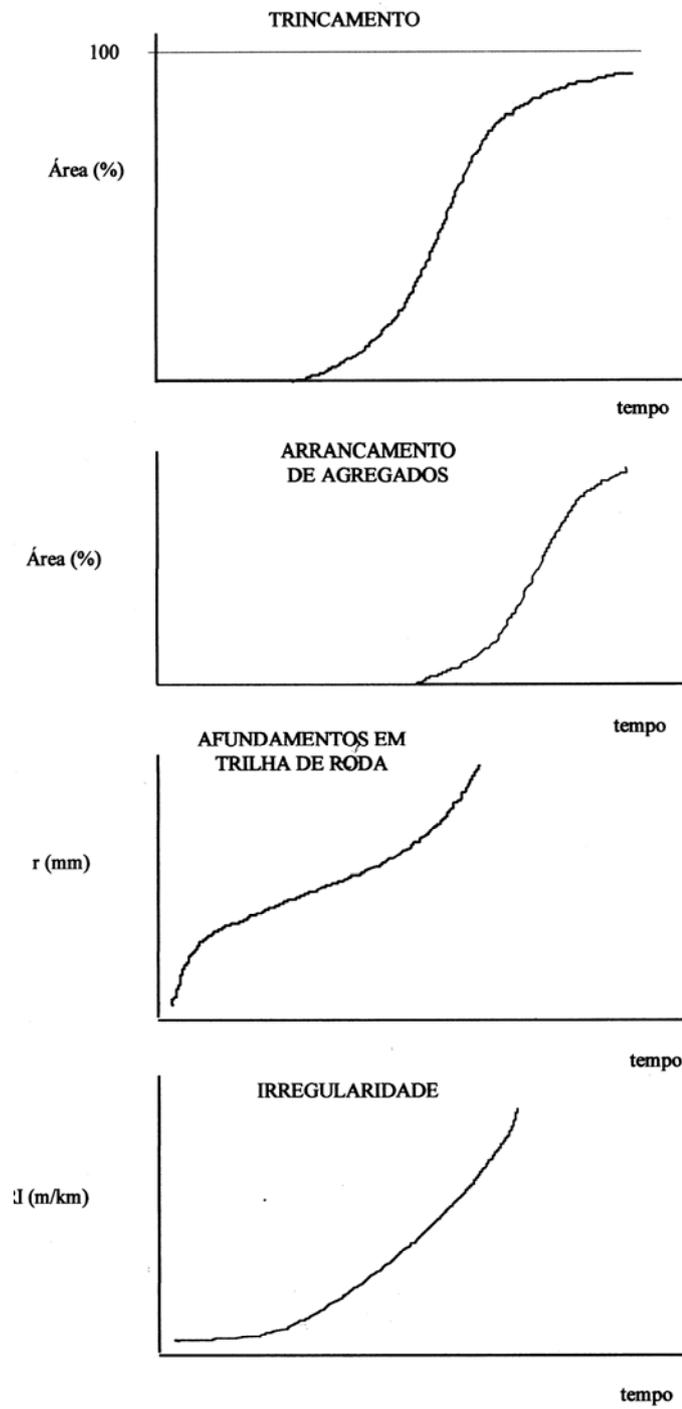


Figura 2.1 Mecanismos principais de deterioração de um pavimento asfáltico.

Os pavimentos se deterioram, ao longo do tempo, por meio de uma diversidade de mecanismos e processos, que muitas vezes interagem entre si e influenciam no comportamento do pavimento. Encontrar relações existentes entre as características da estrutura do pavimento (propriedades dos materiais utilizados nas camadas, estrutura das seções, variabilidade e heterogeneidade construtiva), as condições climáticas, magnitude das cargas de tráfego a que o pavimento está submetido, práticas de manutenção aplicadas e condições de drenagem não é uma tarefa fácil. Contudo, sabe-se que a interação desses fatores condiciona o desempenho futuro do pavimento.

Relações envolvendo essas variáveis são descritas nos modelos de previsão de desempenho, os quais podem ser aplicados em projetos de pavimentos novos ou na restauração de pavimentos deteriorados, mas o dimensionamento tem sua eficácia limitada pela confiabilidade dos modelos, os quais se tornam instrumentos tecnológicos essenciais para análise econômica de rodovias. A validade e a coerência da associação dos componentes de um modelo de previsão de desempenho são determinantes para a confiabilidade dos resultados obtidos em uma análise estrutural, ou seja, o grande desafio tecnológico para aumentar a confiabilidade desses modelos é a calibração experimental de suas previsões teóricas.

Segundo Ceratti (1998), devido a essas limitações surgiram e vêm sendo continuamente aperfeiçoados os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, os quais consistem, essencialmente, da associação entre três componentes fundamentais:

- Um modelo estrutural para o cálculo das respostas da estrutura do pavimento à passagem das cargas do tráfego, respostas estas na forma de tensões, deformações e deflexões de toda estrutura;

- Uma teoria de deterioração que explique, em termos fundamentais, os mecanismos pelos quais os diversos tipos de defeitos de origem estrutural surgem e se propagam, teoria esta que seja função das propriedades dos materiais e das respostas às cargas do tráfego calculadas pelo modelo estrutural;
- Uma calibração experimental das previsões teóricas do modelo, de modo a que este reproduza o desempenho que foi observado em uma base de dados constituída por pavimentos em serviço. Os fatores ou funções de calibração obtidas devem refletir a influência de variáveis que não puderam ser modelizadas de forma adequada.

O uso de métodos empíricos no projeto de misturas, de modelos de comportamento dos materiais de pavimentação e de modelos de falha de pavimentos ajudou no passado pesquisadores e engenheiros a entender melhor os fatores que influenciam o comportamento dos pavimentos (Haas *et al.*, 1994). Porém, existe uma tendência cada vez maior de se utilizar métodos mecanísticos nas atividades envolvidas no dimensionamento de pavimentos. (Silva, 1995; Medina, 1997; Benevides, 2000).

O trincamento em campo é um dos principais itens na avaliação da condição do pavimento para um diagnóstico dos problemas existentes. Por meio de métodos mecanísticos, pesquisadores vêm utilizando conhecimentos da teoria da mecânica da fratura para explicar o fenômeno da fadiga do material e o respectivo trincamento (Rodrigues, 1991; Pinto, 1991; Medina, 1997).

A teoria da mecânica da fratura tem sido usada como uma base racional para a consideração da formação e propagação de trincas nos materiais asfálticos, embora sempre considerando o material como homogêneo (Jayawickrama e Lytton, 1987; Perng, 1989). No Brasil, o trabalho de Rodrigues (1991) contribuiu para disseminar a teoria da mecânica da fratura em problemas de pavimentação. O referido trabalho fez uso da Lei de Paris (Paris e

Erdogan, 1963) para a determinação de parâmetros de fratura de misturas asfálticas a partir de ensaios de fadiga, considerando o material como homogêneo.

O fenômeno do trincamento por fadiga de uma camada asfáltica se processa por meio do crescimento contínuo de uma trinca, desde um comprimento quase nulo (microfissuras iniciais, pré-existentes na massa asfáltica) até atravessar toda a espessura do revestimento. Assim, o aumento da espessura do revestimento sempre resultará em um incremento da vida de serviço, mesmo que a deformação ϵ_t sob o revestimento em um pavimento flexível seja a mesma, uma vez que a espessura que a trinca deverá atravessar será maior, requerendo um número adicional de ciclos de carga (Rodrigues, 2000a).

O trincamento por fadiga é o mecanismo de degradação dominante nos pavimentos flexíveis das rodovias de tráfego médio e pesado.

2.4.3 Diagnóstico do Desempenho do Pavimento

Com relação ao correto diagnóstico do trincamento, deve-se observar que uma atribuição de causas através de um exame apenas visual deve ser considerada provisória, na melhor das hipóteses, mesmo quando o avaliador tem muita experiência. Na maioria dos casos, pode haver mais de uma e, às vezes, até quatro causas para certo tipo de trincamento. A realização de ensaios tende a aumentar as chances de um diagnóstico correto, mas ainda assim a identificação da causa pode ser difícil.

As trincas de um revestimento podem ser classificadas de acordo com sua geometria em longitudinal, transversal, poligonal (couro-de-crocodilo) e em bloco, ou em função do mecanismo que a causou e assim se dividem em trincas de reflexão, escorregamento e retração. As trincas de reflexão ocorrem em pavimentos rígidos ou com base cimentada e uma de suas características marcantes é seu espaçamento sistemático ou regular. As trincas de

escorregamento costumam ter um formato que se acentua crescentemente, contudo, sua visualização poderá ser prejudicada quando o trincamento ocorrer em uma grande área. Já as trincas de retração possuem como característica principal as indicações de variações volumétricas, que ocorrem independentemente de padrões de tráfego solicitante e fora da área das trilhas de roda, mesmo quando esse padrão de trincamento ocorre nas camadas abaixo do revestimento, elas podem ser observadas devido a sua reflexão.

Com relação às causas, o trincamento tem sido categorizado em dois grandes grupos: trincas devido às cargas do tráfego e trincas que decorrem de outras causas, como as solicitações térmicas, deficiências construtivas e intemperismo. As trincas devido às cargas do tráfego são divididas em trincas de fadiga, trincas produzidas por uma única passagem de uma carga excessiva, escorregamento, as decorrentes de movimentação lateral de aterro e as induzidas por afundamentos excessivos em trilha de roda.

As trincas, não associadas às cargas do tráfego, dividem-se em: provocadas por recalques de aterros, expansão de solos de fundação, por juntas construtivas, por retração de materiais utilizados na estrutura, trincamento causado por baixas temperaturas do concreto asfáltico e trincamento provocado por fadiga térmica, que é a causa mais comum.

Embora existam diversos tipos de trincamento os mais significantes, para efeito de projeto e análise, é o trincamento por fadiga, por reflexão e o térmico. Neste trabalho foi abordado o trincamento por reflexão, que é o trincamento devido às cargas do tráfego.

2.5 O Trincamento por Reflexão

O reforço de pavimentos flexíveis tem como função a recuperação das características funcionais e estruturais do pavimento através da colocação de uma espessura adicional de

concreto asfáltico que deve ser executada sobre o pavimento antigo, possibilitando a recuperação da serventia e da capacidade estrutural e o prolongamento da sua vida útil.

Segundo Neblauer (2002), o prolongamento da vida de serviço do pavimento reforçado é fruto do aumento da capacidade de carga da estrutura, adiando o aparecimento de deformações plásticas e a reflexão de trincas no revestimento.

A solução tradicional de restauração é a aplicação de uma nova camada de concreto asfáltico superposta ao pavimento trincado. Esta é, contudo, uma solução temporária, devido à reflexão ou propagação de trincas das camadas antigas para as novas.

A reflexão de trincas ou propagação de trincas das camadas antigas de revestimento para as novas é considerada um dos principais problemas para o projeto de restauração de pavimentos. Este efeito invalida quaisquer previsões de desempenho convencionais e requer um modelo confiável para fins de dimensionamento, de modo a se minimizar os custos de restauração.

O trincamento prematuro da camada de recapeamento é causado pela sua incapacidade de resistir aos movimentos das camadas subjacentes, que podem ser devido às cargas do tráfego, que geram deflexões diferenciais, por expansão ou contração do subleito, ou até da própria camada asfáltica, devido a mudanças de temperatura. Esses movimentos criam tensões de cisalhamento ou de tração na camada de reforço, que podem se tornar maiores que as tensões admissíveis de cisalhamento e de tração do concreto asfáltico, causando, por conseguinte, o surgimento de uma trinca na camada de reforço.

O reaparecimento na superfície da camada asfáltica de recapeamento do padrão de trincamento subjacente se deve à incapacidade que o concreto asfáltico convencional tem de resistir às deformações elevadas que são geradas em torno da extremidade das trincas. Essas deformações podem ser geradas por:

- Deslocamentos verticais diferenciais entre as paredes de uma trinca, quando da passagem de uma carga de roda, que geram deformações cisalhantes na camada de recapeamento;
- Movimentos horizontais de abertura e fechamento da trinca, devido aos ciclos térmicos ou à expansão e retração do solo de subleito sob variações de umidade.

Segundo Montestruque (1996), enquanto no revestimento de um pavimento flexível a trinca de fadiga surgirá na fibra inferior da camada, região onde se tem a máxima deformação de tração, no pavimento recapeado a trinca de reflexão surgirá na região de máxima densidade de energia de distorção, que é aquela no entorno da extremidade da trinca do revestimento subjacente à camada de recapeamento.

A energia de distorção fornece uma medida de deformação plástica esperada que resulta da concentração de tensões na extremidade da trinca. Pode se ter, assim, um plano de enfraquecimento onde a deformação plástica máxima ocorre, fato que poderia gerar o desligamento entre a camada de reforço e o pavimento existente. (Rodrigues, 2000a).

Segundo Rodrigues (1996), a reflexão de trincas através de camadas asfálticas aplicadas como recapeamento em pavimentos trincados tem sido levada em conta, nos projetos, por meio de expedientes bastante simplistas, podendo-se apontar:

- O uso de espessuras mínimas para a camada asfáltica de recapeamento. Alguns métodos de projeto indicam 7,5 cm para essa espessura mínima, enquanto que outros exigem 10 cm. A CALTRANS recomenda o uso de uma espessura mínima igual à metade da espessura da camada asfáltica trincada existente;
- Indicações empíricas, que traduzem dados observados em nível de rede, como a “reflexão de trincas ocorre a uma velocidade média de 1 cm por ano”.

Esses critérios são extremamente grosseiros e de baixíssima confiabilidade, na medida em que ignoram os principais parâmetros que influem no fenômeno (cargas do tráfego, padrão e severidade das trincas existentes, resistência à fadiga da mistura asfáltica, por exemplo). Existem, inclusive, métodos para o dimensionamento da espessura da camada asfáltica de recapeamento que não consideram a reflexão de trincas, como o Método DNER PRO-11/79. Tais métodos procuram, usualmente, determinar a espessura da camada asfáltica de recapeamento capaz de reduzir as deflexões do pavimento a um valor “admissível”, como se o nível de deflexão do pavimento fosse um parâmetro fundamental para o desempenho do pavimento restaurado.

Além desses aspectos, deve-se considerar que o recapeamento simples tende a ser uma solução de baixa eficácia econômica quando a reflexão de trincas é o mecanismo que controlará o desempenho do pavimento restaurado. Esse fato levou à criação das mais diversas técnicas de restauração, que vão desde a reciclagem *in situ* do pavimento até as soluções classificadas como “*Sistemas Anti-Reflexão de Trincas*”, que envolvem:

- Tratamento prévio do pavimento existente, visando diminuir o potencial para a ocorrência da reflexão. Como exemplos, têm-se: fresagem, reciclagem, execução de reparos em áreas localizadas onde a degradação estrutural é muito severa, estabilização de juntas, e selagem de trincas;
- Construção de camada intermediária entre o pavimento existente e a camada asfáltica de recapeamento. As funções que a camada intermediária pode vir a ter são: absorção de tensões ou de deformações, desvio do processo de trincamento, impermeabilização, e alívio de deflexões diferenciais elevadas. Antes da aplicação dessa camada, pode ser necessário ou conveniente construir-se uma camada de regularização;

- Projeto da camada de recapeamento, o que envolve desde o dimensionamento de espessuras até a especificação da mistura asfáltica, a fim de aumentar sua capacidade de resistir às tensões ou deformações impostas pela movimentação das trincas subjacentes. Esses efeitos podem ser obtidos por meio da escolha do ligante (com ou sem modificação por meio de polímeros), adição de fibras curtas ou reforço da camada através de fios de aço ou fibra de vidro.

Além das funções já referidas, uma camada intermediária deve atender a requisitos relativos a:

Absorção de Tensões: quando a concentração de tensões na extremidade das trincas é suportada por um material intermediário de elevada ductilidade (asfalto-borracha, asfalto-polímero), o qual não se rompe e alivia as tensões para a camada de recapeamento subjacente;

Bloqueio de Deslocamentos: quando as deflexões diferenciais entre as paredes das trincas não levam a deformações cisalhantes excessivas na camada de recapeamento, por terem sido atenuadas por uma camada intermediária (granular, por exemplo);

Desacoplamento Térmico: quando as movimentações térmicas da camada trincada subjacente não são transferidas para a camada de recapeamento, devido a uma aderência parcial ou à baixa rigidez da camada intermediária, sob os ciclos lentos associados às variações térmicas;

Desvio de Trincas: quando o trincamento é redirecionado para a horizontal ou quando uma trinca se distribui por uma série de microfissuras.

Os requisitos de *absorção de tensões térmicas*, provenientes de movimentações das trincas subjacentes ou da própria camada de recapeamento e a de *transmissão de tensões das cargas do tráfego* para as camadas subjacentes do pavimento têm levado à utilização preponderante de materiais asfálticos, modificados ou não, na constituição das camadas

intermediárias, em vista das propriedades visco-elasto-plásticas do asfalto: seu módulo de rigidez diminui com o aumento do tempo de solitação, propiciando elevada deformabilidade para que a camada possa acompanhar as deformações lentas de origem térmica, enquanto que, nas solitações rápidas produzidas pelas cargas do tráfego, o módulo de rigidez é elevado, assegurando a transmissão das tensões para as camadas inferiores. Outra observação diz respeito à necessidade de aderência entre a camada intermediária e o pavimento antigo e a camada de recapeamento, a qual é fundamental para a sua eficácia mecânica. Essa aderência deve ser permanente e uniforme.

A interface entre a camada de reforço e o pavimento existente é a posição mais adequada para se aplicar um tratamento com a finalidade de controlar a reflexão de trincas, Rodrigues (1991). Os materiais usualmente utilizados como camada intermediária são argamassa asfáltica, geotêxtil impregnado com betume, betume impregnado “in situ” com fibras, geotêxteis, grelhas metálicas e geogrelhas (Colombier, 1989).

Rigo *et al* (1993) apresenta para esses sistemas uma tentativa de se estabelecer um estado-da-arte, juntamente com propostas de modelos para a previsão da ocorrência da reflexão de trincas. Grande parte dessas propostas utiliza o método dos elementos finitos como ferramenta de cálculo para a modelização do sistema estrutural envolvido, em vista do recurso de se simular trincas usando o método e da facilidade de se analisar os efeitos da inserção de camadas especiais intermediárias entre o pavimento trincado e a camada de recapeamento.

Um modelo verdadeiramente racional deve levar em conta os principais fatores que contribuem para o fenômeno da reflexão de trincas. Além disso, o modelo deve ser consistente, inclusive em situações-limite, indicando quando a reflexão de trincas deixa de ser o mecanismo de degradação predominante. Os modelos empíricos falham com relação a esses aspectos, da mesma forma como modelos aproximados, baseados nas tensões e deformações

calculadas pela teoria de camadas elásticas. O método dos elementos finitos com sua potencialidade para a simulação de trincas em uma estrutura tende a ser o modelo estrutural mais recomendável para a base mecanística de um modelo confiável.

Assim, o método mecanístico, que vem sendo muito utilizado aplica os princípios da mecânica da fratura para explicar o mecanismo de deterioração, a progressão da trinca e a previsão da vida de fadiga dos pavimentos. Esse método permite considerar a ruptura por fadiga como o resultado de dois processos distintos: o início da deterioração e a propagação de trincas.

Nesta pesquisa foi efetuada uma simulação pelo método dos elementos finitos de ensaios de fadiga em vigas de concreto asfáltico levando em conta a presença de trincas na camada subjacente da viga. Os resultados obtidos foram comparados com ensaios realizados, a fim de calibrar os parâmetros do modelo geral para a previsão da vida de fadiga de revestimentos asfálticos.

Diversas técnicas vêm sendo testadas no sentido de se encontrar uma solução para controlar esses mecanismos de deterioração atuantes em pavimentos asfálticos. Como este trabalho propõe uma análise quanto à utilização de geogrelhas de reforço, cabe elucidar a atuação das geogrelhas como mecanismo de reforço.

2.6 Materiais de Reforço

2.6.1 Introdução

A idéia de se reforçar o pavimento, ou seja, de reduzir a atuação dos esforços principalmente nas camadas asfálticas do pavimento, com o intuito de minimizar a ação dos

principais mecanismos de deterioração nos pavimentos, o trincamento por fadiga, vem se desenvolvendo há várias décadas através de pesquisas e trechos experimentais.

A aplicação de geossintéticos, em especial os geotêxteis e as geogrelhas, surgiu da necessidade cada vez maior de procurar novos materiais que consigam um reforço efetivo nas estruturas do pavimento.

Os geotêxteis e as geogrelhas vêm sendo aplicados na construção de pavimentos novos e na restauração de pavimentos deteriorados visando, basicamente, aumentar a confiabilidade da solução da qual fazem parte, especialmente em situações onde as técnicas convencionais levam a custos elevados ou a intervenções de difícil execução. Na construção, destaca-se o caso de estruturas onde há grande propensão a deformações plásticas, não associadas às camadas asfálticas. Na restauração, os pavimentos severamente trincados submetidos a tráfego pesado ou a movimentações de natureza térmica ou devido a variações de umidade nos solos constituem o principal problema onde há grande potencial para o uso de soluções com geossintéticos (Rodrigues, 2003).

Os geossintéticos podem ser definidos de acordo com a Norma Brasileira - NBR 12553 (2002) como sendo “produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), industrializados, desenvolvidos para a utilização em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, dentre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial”.

O estudo das propriedades dos geossintéticos se divide basicamente em: propriedades físicas, propriedades mecânicas e propriedades hidráulicas, associadas às funções que desempenhará. Segundo a NBR 12553 (2002) as principais funções que os geossintéticos podem desempenhar são: filtração (retenção do solo ou de outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento), drenagem (coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético), barreira para controle de fluxo (controle ou desvio de fluxo),

reforço (utilização das propriedades mecânicas de um geossintético para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica) proteção: (limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas), separação (ação de impedir a mistura ou interação de materiais adjacentes) e controle de erosão superficial (prevenção da erosão superficial de partículas do solo devido às forças do vento ou escoamento superficial).

A função de reforço, com a inclusão de geossintéticos reforçando o revestimento asfáltico proporcionará melhores condições de funcionamento do conjunto das camadas asfálticas.

A idéia de reforçar a mistura asfáltica usando geogrelhas teve início durante a primeira crise do petróleo, na década de 1970. Procurou-se desenvolver alternativas para o reforço de misturas asfálticas, através de materiais que possibilitem a melhoria do desempenho estrutural dos pavimentos e a redução de custos, seja pela redução de espessuras, ou acréscimo na vida de serviço do pavimento.

Relata-se que nessa época o primeiro material utilizado no reforço de misturas asfálticas foi a geogrelha. A intenção original era de que este material pudesse reduzir a quantidade de material asfáltico utilizado, mas isso não ocorreu, pois comprovadamente esta não é uma combinação proporcionada pelas geogrelhas (Montestruque, 1996).

Os primeiros materiais utilizados para reforçar os pavimentos asfálticos foram da indústria do poliéster, seguido em breve pelas geogrelhas de fibra de vidro. Na concepção de Rigo (1993), o reforço, entendido na maneira clássica, exige que o módulo de elasticidade do material de reforço seja maior que o material a ser reforçado. Este efeito pode ser obtido pela inserção de tecidos reforçados, grelhas, fibras ou geogrelhas na região inferior do revestimento ou recapeamento asfáltico.

A classificação dos produtos de reforço tem sido feita baseada na maneira de transferência de esforços: intertravamento da camada (grelhas), adesão entre camadas

(tecidos) e materiais que possibilitem ambos os mecanismos (combinação de grelha e tecido), (Sanders, 2000).

Os materiais normalmente utilizados para reforçar a estrutura de pavimentos flexíveis podem ser classificados como: grelhas (metálica, plásticas, fibras de vidro, geogrelhas) e tecidos/manta (geotêxteis).

Com o importante desenvolvimento dos geossintéticos, têm sido criadas geogrelhas de polímeros de alta resistência, que têm sido usadas com sucesso como elemento de reforço estrutural e retardador de reflexão de trincas em pavimentos asfálticos, no caso específico em estudo desta dissertação: geogrelha Hatelit C 40/17.

2.6.2 Geogrelhas poliméricas

Geogrelhas são estruturas em forma de grelha, compostas geralmente de polietileno de alta densidade (PEAD), de poliéster (PET) ou de polipropileno (PP), caracterizando pela baixa deformabilidade e elevada resistência à tração. Tem com função predominante a de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas. São constituídas por elementos resistentes à tração, sendo considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas, o que caracteriza o tipo de união existente entre os elementos ortogonais. A Figura 2.2 ilustra um modelo de Geogrelha bidirecional.

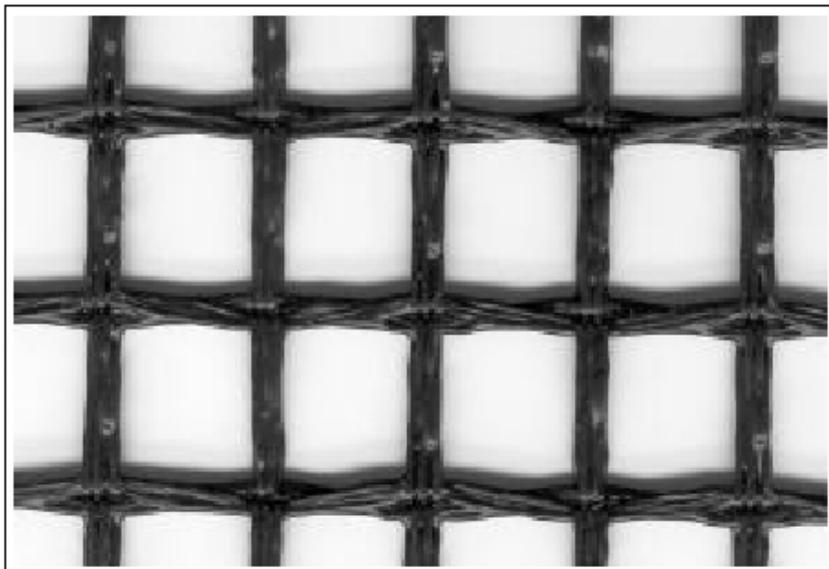


Figura 2.2 Geogrelha bidirecional.

A utilização da geogrelha como medida de restauração de um pavimento é dependente principalmente do mecanismo de deterioração predominante, da estrutura do pavimento e do tráfego atuante na rodovia.

Podem ser utilizadas como camada intermediária entre um revestimento deteriorado e uma nova camada asfáltica de recapeamento, neste caso tem a função de um sistema anti-reflexão de trincas.

A principal utilização da geogrelha é a de reforço estrutural, possibilitando dessa forma um acréscimo na vida de serviço do pavimento. Tanto podem ser inseridas numa nova camada de recapeamento asfáltico como podem ser utilizadas em pavimentos novos.

A geogrelha sendo utilizada como reforço proporciona uma alta resistência à tração dentro do pavimento, complementando as propriedades mecânicas da mistura asfáltica e minimizando o desenvolvimento de afundamentos em trilhas de roda, causadas por deformações permanentes da estrutura.

Quanto ao tipo de estrutura, geralmente são utilizadas em pavimentos flexíveis, mas também podem ser utilizadas em pavimentos semi – rígidos, invertidos e rígidos. O tipo de estrutura não é um limitante à utilização da geogrelha de reforço, isto é, trata-se de um condicionante à decisão do correto posicionamento da geogrelha na estrutura.

A geogrelha de estrutura aberta tem módulo de elasticidade alto, comparado com o geotêxtil impregnado com asfalto e com o próprio concreto asfáltico. As deformações devido às tensões são relativamente baixas. Conseqüentemente, parte das tensões induzida pelo tráfego será absorvida pela geogrelha.

A instalação da geogrelha no campo é um processo simples, não necessita a mobilização de muitos equipamentos e inovadoras técnicas de execução, porém requer alguns cuidados especiais no que tange ao armazenamento, transporte e processo de instalação.

A instalação também pode prejudicar ou garantir sua eficiência no pavimento. A instalação mal executada, fugindo às recomendações específicas para cada material, pode prejudicar sua condição de trabalhar em conjunto com a camada asfáltica de forma adequada. Uma maneira de evitar problemas decorrentes da má execução do pavimento com sistema retardador de trincas é se adotar a utilização de materiais que apresentam uma condição de instalação facilitada, mesmo porque isto representaria um custo de instalação reduzido. Isto é claro, desde que o material instalado nestas condições garanta um desempenho eficiente.

É importante destacar que o material deve ser produzido a partir de matéria-prima compatível com as altas temperaturas do concreto asfáltico. Normalmente o concreto asfáltico usinado à quente, material comum em recapeamento de rodovias, é executado sob temperaturas da ordem de 180°C. Assim, os materiais não podem ter suas propriedades mecânicas alteradas sob temperaturas dessa ordem.

É imprescindível que o elemento de reforço possua uma ótima aderência com as camadas asfálticas, sendo capaz de absorver e transmitir as tensões devido a cargas cíclicas, o que se traduz numa resposta à fadiga do material.

A geogrelha pode cumprir seu propósito somente se for instalada adequadamente. Requer um esticamento e uma fixação no pavimento antigo antes de receber a camada de reforço. Uma boa ligação entre as camadas é de vital importância. Por esta razão, a malha não atua como um separador, integrando-se no sistema formado pelo asfalto e pelo agregado. Detalhes técnicos de instalação são descritos por Brown *et al.* (1985) e por Gilchrist *et al.* (1988).

As experiências realizadas por Bondt (1999), com o uso do reforço estrutural com geogrelha em recapeamento asfáltico sobre vigas, relatam modelos relacionados ao carregamento que quantificam o estado de tensões e deslocamentos em vigas prismáticas.

Estes modelos foram utilizados para a interpretação dos ensaios de laboratório realizados em vigas prismáticas em concreto asfáltico por Montestruque (2002), descritos no Capítulo 3. Estes ensaios de laboratório foram interpretados neste trabalho com base na simulação pelo método dos elementos finitos.

3. ENSAIOS DE FADIGA

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se um estudo exploratório já realizado, em laboratório, dos efeitos da vida de fadiga de vigotas prismáticas de concreto asfáltico reforçadas com geogrelha. Utilizaram-se ensaios de flexão alternada de cargas repetidas para esta análise (Montestruque, 2002). Expôs-se ainda, a análise dos resultados dos ensaios e a forma como os mesmos foram utilizados nesta pesquisa.

A fadiga está associada à ocorrência de deterioração localizada em um elemento estrutural gerada pela repetição de solicitações, ocasionando o trincamento gradativo da estrutura até uma pressuposta ruptura. Normalmente resulta na redução da resistência do material a tensões aplicadas seguidamente. Trata-se de um fenômeno de natureza intrincada, portanto, de difícil equacionamento.

A distribuição de tensões na estrutura do pavimento resulta de uma complexa combinação de fatores ambientais, solicitações atuantes, geometria da estrutura, condições de vinculação e propriedades dos materiais componentes. Isso evidencia a dificuldade na

representação exata do comportamento da estrutura sob condições reais de solicitação por meio de dispositivos simples de ensaios de laboratório. O principal objetivo de um programa de ensaios e da avaliação dos resultados é proporcionar ao projetista informação suficiente para fazer uma seleção razoavelmente confiável de medidas para implementação em campo.

Um programa de ensaios deve almejar a caracterização do comportamento ou diferente desempenho de um material e proporcionar as bases para o critério de projeto. A maneira mais correta de alcançar esses objetivos é o desenvolvimento de equipamentos de ensaios e procedimentos que simulem aproximadamente as condições reais de campo. Dessa forma, o desempenho da camada de reforço com ou sem tratamento pode ser avaliado de forma comparativa, com vistas ao controle da reflexão de trincas.

Nos últimos anos, têm-se realizado vários estudos sobre comportamento à fadiga de misturas betuminosas. Para que possam ser aplicados programas computacionais para analisar estruturas de pavimentos flexíveis, deve-se conhecer a vida de fadiga do revestimento betuminoso sob tensões repetidas.

Conforme Momm (2000), a simulação do comportamento à fadiga dos concretos asfálticos pode ser feita em pistas experimentais (em verdadeira grandeza), ou em laboratório sobre corpos de prova, método mais usual e econômico.

Na simulação do comportamento à fadiga em laboratório, os ensaios distinguem-se em ensaios de tração, flexão e cisalhamento. Nos ensaios de flexão, faz-se a representação das solicitações do tráfego nas camadas de concreto asfáltico do pavimento. Representam-se diretamente as tensões de tração com os ensaios de tração e, pela realização de ensaios de cisalhamento, verificam-se os esforços de cisalhamento dentro das camadas do pavimento.

Uma grande variedade de equipamentos e de procedimentos de ensaio tem sido desenvolvida por pesquisadores de diferentes países. Alguns destes têm considerado as cargas cíclicas devido às variações térmicas, isoladamente das cargas cíclicas devido ao tráfego.

Poucos têm considerado simultaneamente ambos os tipos de solicitações. Para estimativa da vida de fadiga e das propriedades elásticas das misturas betuminosas, dispõe-se dos ensaios dinâmicos, que são os que melhor reproduzem as condições de carga induzidas pelo tráfego.

Os ensaios dinâmicos para determinar a vida de fadiga dos materiais são diferentes quanto ao processo empregado para desenvolver tensões e deformações repetidas e também quanto à geometria das amostras ensaiadas.

No que diz respeito ao tipo de carregamento aplicado, que devem representar condições extremas que podem ocorrer em campo, os ensaios de fadiga pode ser de dois tipos:

- tensão controlada: aplicação constante de carga e a tensão permanecem constantes ao longo do tempo. A deformação aumenta fortemente no início do ensaio, estabilizando-se ao longo do seu transcurso, com um aumento lento e progressivo, e nos instantes que antecede à ruptura, um aumento vertiginoso da deformação até a ruptura.

- deformação controlada: aplicação de cargas repetidas que produzem uma deformação repetida constante ao longo do ensaio. A tensão diminui, com uma queda importante nos instantes iniciais, estabilizando-se em uma queda suave ao longo da maior parte da duração do ensaio e uma queda de tensão forte nos instantes que antecedem a ruptura. Nesse tipo de ensaio, a tensão se adapta à deformação que é controlada ao longo do ensaio.

Para Riviere (1996), os ensaios a tensão controlada geram resultados mais pessimistas que à deformação controlada e com resultados menos dispersos. São ensaios mais agressivos, pois a deformação aumenta durante todo o ensaio. Contudo, sua utilização é mais usual principalmente devido à praticidade e aos custos reduzidos de realização destes ensaios.

O estudo exploratório realizado por Montestruque (2002) objetivou a avaliação de alguns dos efeitos que podem ser trazidos pela geogrelha de reforço para a melhoria do desempenho de pavimentos asfálticos flexíveis, permitindo a análise de viabilidade de um estudo mais aprofundado. Para tanto, foram executados ensaios de cargas repetidas em

vigotas prismáticas apoiadas em base elástica submetidas a carregamentos de flexão e cisalhamento, com e sem a presença da referida geogrelha.

3.2 Estrutura dos Ensaiois

3.2.1 Introdução

Os ensaios de fadiga foram divididos em três etapas:

- Primeira etapa: foi realizada com a posição da geogrelha a 20 mm sobre a extremidade de uma trinca pré-formada de 3 mm. O critério adotado para encerramento do ensaio foi quando a deformação plástica da viga atingiu 2,5 mm.
- Segunda etapa: foi executada com a posição da geogrelha exatamente sobre a extremidade de uma trinca pré-formada com aberturas variadas de 3, 6 e 9 mm, e teve critério de finalização de ensaio quando as primeiras trincas apareceram na superfície.
- Terceira etapa: teve a posição da geogrelha igual à etapa anterior, com a diferença de que a finalização do ensaio deu-se com a ruptura da viga.

A síntese dos ensaios de fadiga realizados com geogrelha é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Síntese dos Ensaiois de Fadiga Realizados com Geogrelha.

Etapa	Primeira	Segunda	Terceira
Geogrelha	Tipo I	Tipo I	Tipo I, Tipo II, Tipo III
Abertura: pré-trinca	3 mm	3 mm; 6 mm; 9 mm	3 mm
Posição da geogrelha	20 mm sobre extremidade da trinca	Diretamente sobre extremidade da trinca	Diretamente sobre extremidade da trinca
Posição da carga	Flexão, Cisalhamento	Flexão, Cisalhamento	Flexão
Pressão de contato	326,5; 424,5 e 549 (kN/m ²)	549 kN/m ²	549 kN/m ²
Critério de finalização	Deformação plástica de 2,5 mm	Aparecimento de trincas na superfície	Ruptura

Para efeito de simular a passagem de uma carga de roda em movimento, a posição das cargas em relação à trinca foi variada, analisando-se os dois carregamentos críticos indicados na Figura 3.1:

- *Posição de flexão*, onde a trinca é forçada a crescer em vista das deformações de tração, normais ao plano da trinca e em movimento de abertura, Modo I (Figura 3.1b);
- *Posição cisalhante*, onde a trinca é forçada a crescer por movimentação em seu próprio plano, decorrente de deformações cisalhantes, Modo II. Esta posição ocorre duas vezes a cada passagem da carga de roda (Figura 3.1a e 3.1c), enquanto que a posição de flexão ocorre apenas uma vez (Figura 3.1b).

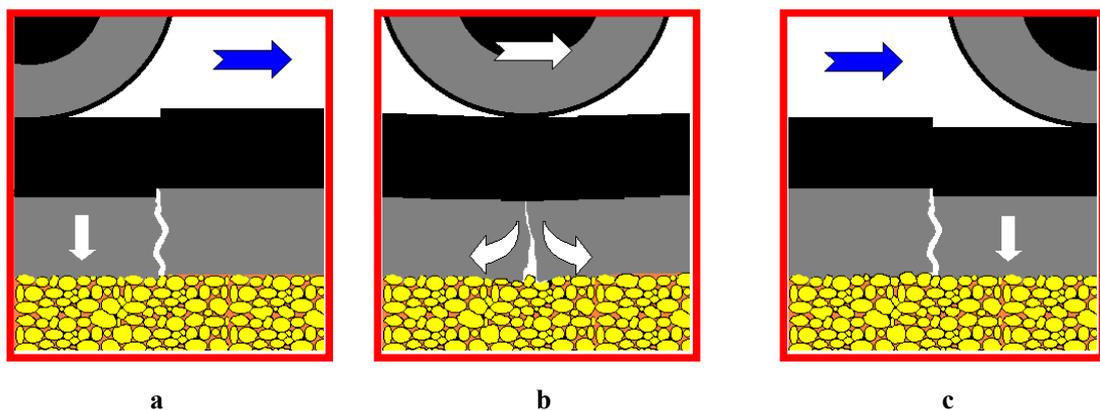


Figura 3.1 Solicitações Críticas na Extremidade da Trinca.

As peculiaridades de cada etapa de ensaios serão descritas nos itens seguintes.

3.2.2 Primeira Etapa

Foram moldadas dezoito vigas com geogrelha de reforço e doze vigas sem reforço. A granulometria dos agregados adotada corresponde à faixa C do DNER, 6% vazios de ar.

As vigotas prismáticas de concreto asfáltico tinham 460 mm de comprimento, base de 75 mm de largura e altura de 75 mm. A pré-trinca foi formada através da moldagem de duas

vigas de 75 x 75 x 228,5 mm as quais foram coladas na anterior mediante uma pintura de ligação asfáltica, deixando no centro uma abertura de 3 mm desta forma a geogrelha ficou posicionada a 20 mm sobre a extremidade da pré-trinca. As cargas repetidas foram aplicadas até provocar a ruptura por fadiga do corpo de prova ou atingir uma deformação plástica de 2,5 mm. A idéia inicial era medir o crescimento da trinca em função do número de ciclos de carga. Visto que após várias horas de ensaio não se observou a formação de uma trinca contínua cujo crescimento pudesse ser medido, decidiu-se pela adoção do critério acima (deformação plástica de 2,5 mm). A geogrelha ensaiada, de filamentos contínuos de poliéster de alta tenacidade, tem resistência à tração de 50 kN/m a 11% de deformação com tamanho de malha de 40 x 40 mm recoberta com um banho betuminoso (Hatelit® C 40/17).

Os ensaios de fadiga nesta primeira etapa foram realizados com a geogrelha posicionada a 20 mm sobre a extremidade da trinca pré-formada com abertura de 3 mm. Além disso, foi colocada uma base elástica (borracha) de 20 mm de espessura sob as vigas com a finalidade de simular a condição de suporte de campo. A carga P foi aplicada na posição de flexão (Figura 3.2) e na posição cisalhante (Figura 3.3) por meio de um equipamento hidráulico através de uma chapa de aço, com dimensões de 40 x 75 mm, responsável pela geração de pressões. As dimensões referidas nessas figuras são:

$$f= 40 \text{ mm}$$

$$t_1= 75 \text{ mm}$$

$$t_2= 75 \text{ mm}$$

$$t_3= 20 \text{ mm}$$

$$t_4= 20 \text{ mm}$$

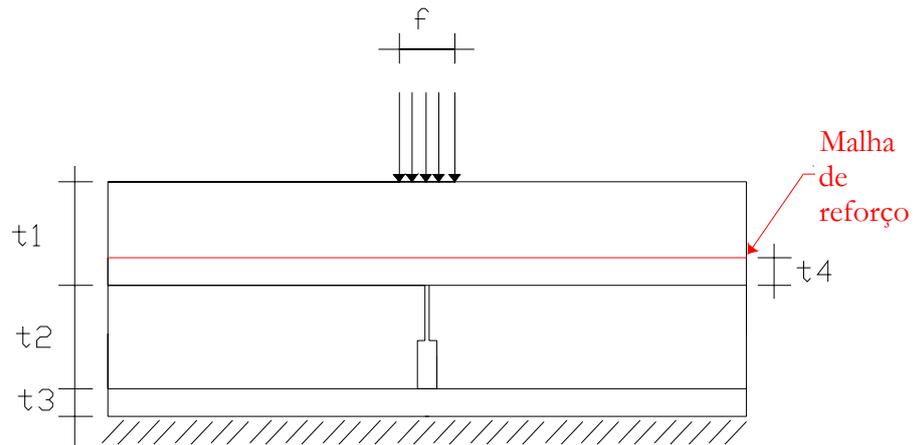


Figura 3.2 Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas (Posição de Flexão).

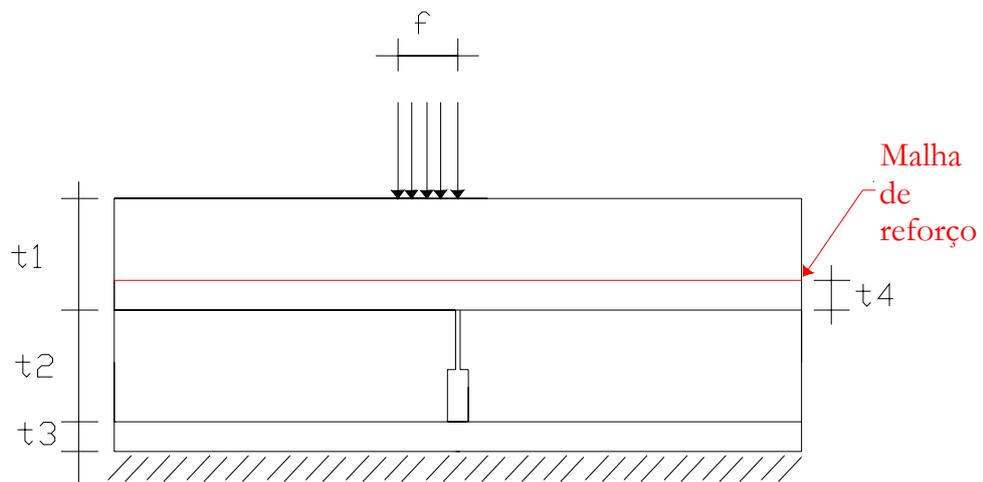


Figura 3.3 Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas (Posição Cisalhante).

Durante a realização dos ensaios foi efetuada uma inspeção visual com seus respectivos números de ciclos. Os resultados obtidos mostraram que a geogrelha como camada intermediária tem um efeito benéfico, aumentando a vida de propagação das trincas. Neste estudo Montestruque (2002), teve como resultado um efeito benéfico com a geogrelha superior ao do efeito com o geotêxtil impregnado com asfalto, também estudado por ele (Montestruque, 1996).

Nas vigas sem a geogrelha, o início do trincamento ocorreu cedo e a propagação foi rápida. O ensaio foi finalizado quando a ascensão vertical da trinca alcançou a espessura da viga quebrando a viga em duas metades. A viga foi quebrada antes mesmo de atingir o critério de finalização do ensaio.

Nas vigas com a geogrelha, essa ascensão vertical foi redirecionada quando a trinca alcançou a posição da geogrelha, mudando o mecanismo de trincamento, e passando a se ter em vez de uma única trinca com grande potencial de propagação uma série de micro trincas com menor potencial. A função de reforço da geogrelha melhorou de forma significativa a redistribuição de tensões em torno da trinca. Este fato foi observado tanto para a posição da carga em flexão como para a posição cisalhante. No modo cisalhante, para a maior pressão de contato ocorreu um puncionamento do pistão de aplicação de carga sobre a viga, devido à diferença de rigidez entre a chapa de aço e o concreto asfáltico, gerando na viga uma trinca que teve seu início no contato com a chapa de aço e caminhando em sentido oposto a uma trinca de reflexão.

Montestruque (2002) expressou os resultados quantitativos através do seguinte modelo, indicado pela Lei de Paris (Rodrigues, 1998).

O fator de efetividade da geogrelha (que representa o efeito benéfico da geogrelha) é dado pela relação $FEG = N_{f(\text{com geogrelha})} / N_{f(\text{sem geogrelha})}$ onde a vida de fadiga (N_f) para cada caso foi calculada como (Equação 3.1):

$$N_f = \frac{1}{c_f}, \quad (3.1)$$

sendo c_f o consumo a fadiga dado por (Equação 3.2):

$$c_f = \frac{1}{N_{f(B)}} + \frac{2}{N_{f(S)}}. \quad (3.2)$$

Sendo que $N_{f(B)}$ representa a vida de fadiga da viga com a carga na posição de flexão e $N_{f(S)}$ a vida de fadiga na posição cisalhante.

Os valores calculados do FEG nos ensaios realizados em relação às vidas de fadiga obtidas, são mostrados nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 para pressões de contato de 549 kN/m², 424,5 kN/m² e 326,5 kN/m².

Tabela 3.2 Fator de Efetividade para a pressão de 549 kN/m² (carga 1,68 kN).

Viga	$N_{f(B)}$	$N_{f(S)}$	C_{fI}	N_f
Sem Geogrelha	22350	40270	$9,44 \times 10^{-5}$	$1,10 \times 10^4$
Com geogrelha	83520	82790	$3,61 \times 10^{-5}$	$2,76 \times 10^4$
$[N_{f(Geogrelha)} / N_{f(Convencional)}]$ EFICIENCIA DA GEOGRELHA = 2,61				

Tabela 3.3 Fator de Efetividade para a pressão de 424,5 kN/m² (carga 1,3 kN).

Viga	$N_{f(B)}$	$N_{f(S)}$	C_{fI}	N_f
Sem Geogrelha	63650	91250	$3,76 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^4$
Com Geogrelha	266780	322740	$9,94 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^5$
$[N_{f(Geogrelha)} / N_{f(Convencional)}]$ EFICIÊNCIA DA GEOGRELHA = 3,79				

Tabela 3.4 Fator de Efetividade para a pressão de 326.5 kN/m² (carga 1,0 kN).

Viga	$N_{f(B)}$	$N_{f(S)}$	C_{fI}	N_f
Sem Geogrelha	111470	187610	$1,96 \times 10^{-5}$	$5,10 \times 10^4$
Com Geogrelha	512910	574350	$5,43 \times 10^{-6}$	$1,84 \times 10^5$
$[N_{f(Geogrelha)} / N_{f(Convencional)}]$ EFICIÊNCIA DA GEOGRELHA = 3,61				

Com relação às vidas de fadiga obtidas, dadas pelos diferentes níveis de carga e considerando-se os modos de flexão e cisalhamento, Montestrucque (2002) mostra os resultados das curvas de fadiga para vigas sem reforço e com geogrelha (**Figura 3.4**).

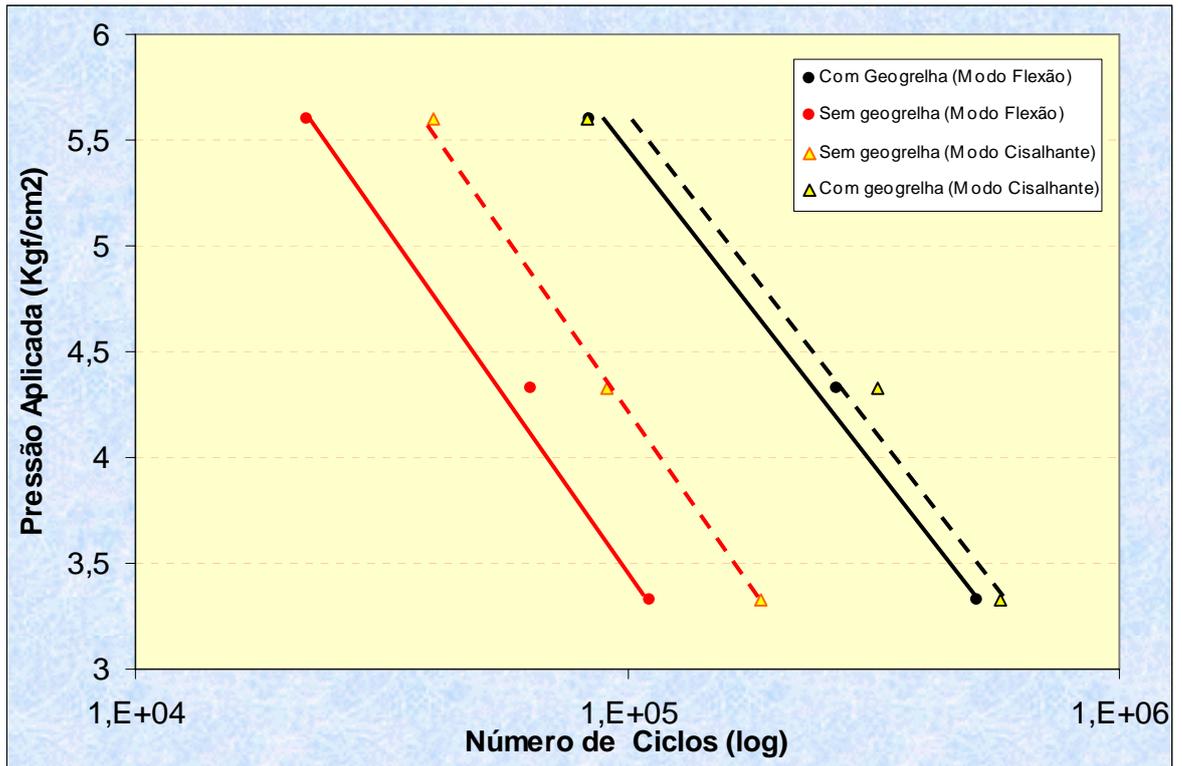


Figura 3.4 Resumo das curvas de fadiga (Montestruque, 2002).

Assim Montestruque (2002) concluiu que a inclusão da geogrelha de reforço eleva a vida de fadiga em 4 vezes, em média e praticamente independe da carga aplicada, podendo-se assim aplicar diretamente o valor obtido em laboratório para o campo.

3.2.3 Segunda Etapa

Foram realizados, nesta etapa, ensaios de fadiga em vigas de concreto asfáltico com a geogrelha posicionada exatamente sobre a extremidade das pré-trincas com abertura variadas de 3 mm, 6 mm e 9 mm (Figura 3.5, 3.5 e 3.6, respectivamente), tendo-se como apoio uma base de borracha. A carga P foi aplicada na posição flexão e cisalhante, como na etapa anterior. As Figuras 3.4 a 3.6 estabelecem os mesmos itens f , t_1 , t_2 , t_3 e t_4 definidos no item

3.2.2. O critério de encerramento do ensaio foi quando as primeiras trincas apareceram na superfície.

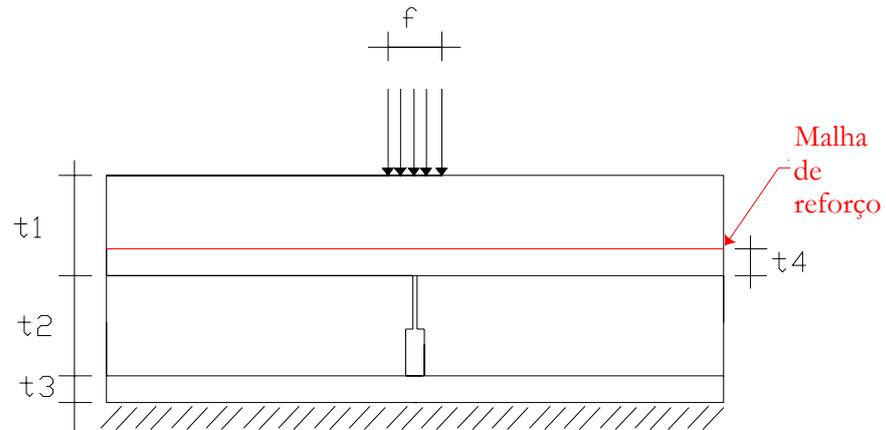


Figura 3.5 Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas – abertura de 3 mm (Posição Flexão).

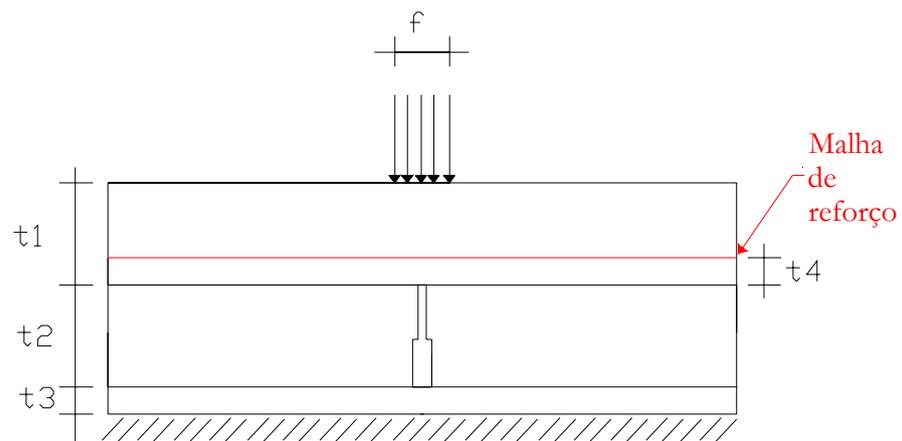


Figura 3.6 Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas – abertura de 6 mm (Posição Flexão).

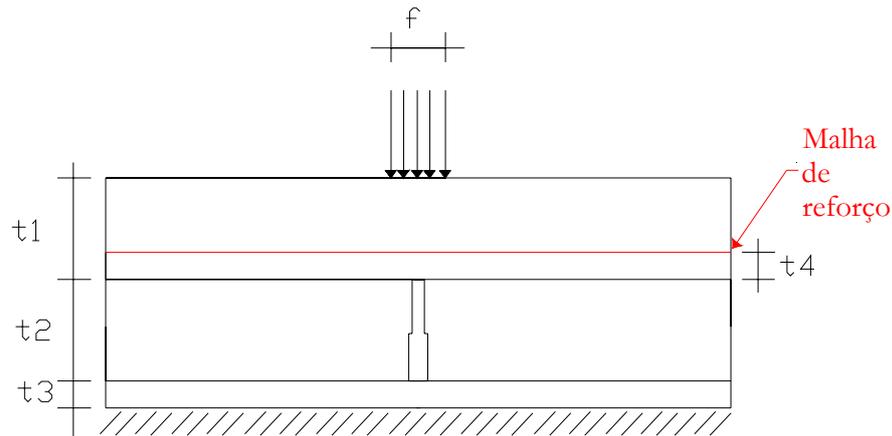


Figura 3.7 Ensaio de Fadiga sob Cargas Repetidas – abertura de 9 mm (Posição Flexão).

Foi moldado em laboratório um total de 16 vigotas de concreto asfáltico de 460 mm de comprimento, 150 mm de altura e 75 mm de largura com aberturas da pré-trinca de 3 mm, 6 mm e 9 mm.

Foi desenvolvida uma forma para a moldagem das vigas em concreto asfáltico especialmente para esta pesquisa. Esta forma tem no centro, um dispositivo que além de formar uma pré-trinca, permite que o material utilizado como camada intermediária fique exatamente na ponta da trinca após o processo de compactação (Montestruque, 2002).

Para tentar simular situações onde um pavimento real encontre-se com diferentes níveis de severidade de trincamento, os ensaios foram realizados com variações de abertura da pré-trinca, com a finalidade de observar e quantificar o desempenho da geogrelha.

Foi utilizada a geogrelha de reforço, de filamentos contínuos de poliéster de alta tenacidade, tem resistência à tração de 50 kN/m @ 11% de deformação com tamanho de malha de 40 x 40 mm recoberta com um banho betuminoso (Hatelit® C 40/17). A geogrelha foi posicionada na extremidade da trinca onde a elevação local das tensões devido à descontinuidade geométrica aumenta a possibilidade de propagação neste ponto.

O ensaio de fadiga no MTS foi concebido como um programa de ensaios de plena confiabilidade nas leituras obtidas. Todos os equipamentos foram calibrados e implementou-se um novo sistema de aquisição de dados completamente computadorizado, cedido pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do ITA. O medidor de deslocamento CAM ("Crack Activity Meter") foi instalado em laboratório com a finalidade de medir os movimentos horizontais de abertura da trinca de reflexão e a deformação plástica durante os ciclos de aplicação de carga. O CAM teve uma fixação através de parafusos embutidos dentro do concreto asfáltico. Um "Clip Gage" serviu para o registro da abertura da pré-trinca durante o ensaio.

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), conforme já citado. 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 5,6 kgf/cm², pressão média 4,76 kgf/cm² e pressão mínima 3,93 kgf/cm². 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.

A obtenção dos resultados foi possível através do uso de uma câmara digital. Os ensaios foram fotografados e assim foi possível uma observação visual, onde foi visto o surgimento e a propagação das trincas vinculadas ao número de ciclos, mostrando o potencial da geogrelha de bloquear a propagação da trinca de reflexão e limitar a abertura da mesma.

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, acompanhando as faces dos agregados que encontraram no caminho. Quando a trinca de reflexão alcançou o comprimento da espessura do CBUQ sobre a trinca, ocorreu a ruptura da viga e com isto a finalização do ensaio.

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, microfissuras 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. Este fato foi observado tanto para a posição da carga em flexão como para a posição cisalhante. Nas vigas com reforço o ensaio foi finalizado quando apenas uma trinca de menor severidade alcançou a superfície. 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 de acompanhamento contínuo.

Da mesma maneira que a etapa do ensaio anterior, a Tabela 3.5 mostra os resultados dos fatores de efetividade da geogrelha obtidos, dados pelo número de ciclos de carga.

Tabela 3.5 Fator de eficiência da geogrelha (*FEG*) para a pressão de 5,6 kgf/cm².

Abertura da pré-trinca	Viga	$N_{f(B)}$ (Ciclos)	$N_{f(S)}$ (Ciclos)	C_{ff} (Ciclos ⁻¹)	N_f (Ciclos)	Eficiência <i>FEG</i>
3 mm	Sem geogrelha	79.884	93.290	$3,40 \times 10^{-5}$	$2,95 \times 10^4$	6,14
	Com geogrelha	490.491	573.560	$5,53 \times 10^{-6}$	$1,81 \times 10^5$	
6 mm	Sem geogrelha	68.690	77.710	$4,03 \times 10^{-5}$	$2,48 \times 10^4$	4,60
	Com geogrelha	329.393	346.400	$8,81 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^5$	
9 mm	Sem geogrelha	63.020	72.920	$4,33 \times 10^{-5}$	$2,31 \times 10^4$	5,11
	Com geogrelha	340.702	364.530	$8,42 \times 10^{-6}$	$1,18 \times 10^5$	

A deformação plástica nas vigas reforçadas com geogrelhas foi reduzida entre 30 e 36% inclusive conseguindo movimentos menores da abertura da pré-trinca e da trinca de reflexão quando comparadas com as vigas sem reforço. As curvas (Figura 3.8 a 13) que

mostram essas deformações e aberturas de trinca para cada número de ciclos estão a seguir (Montestruque, 2002).

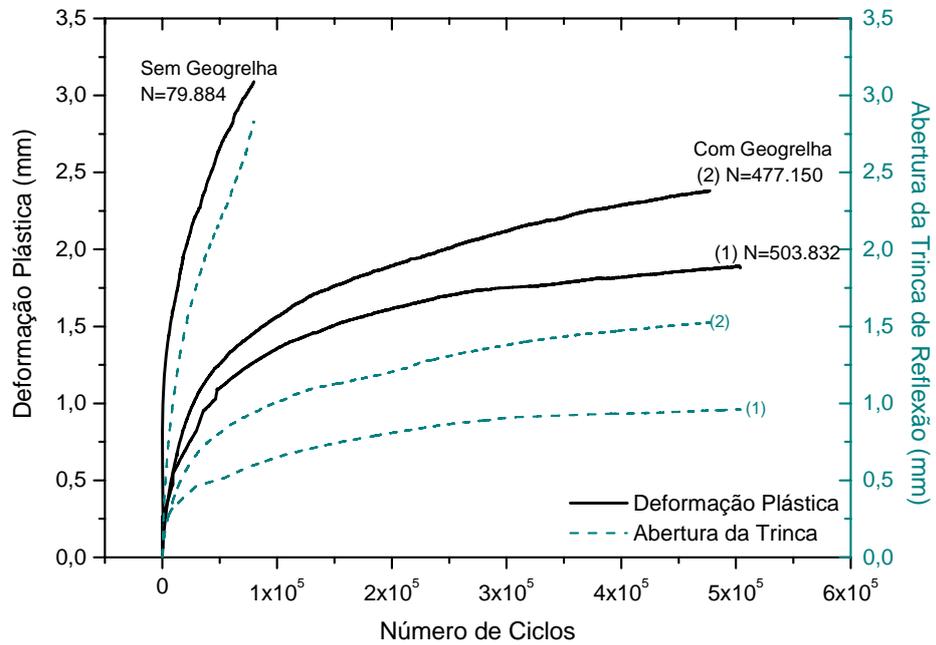


Figura 3.8 Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 3mm (Flexão).

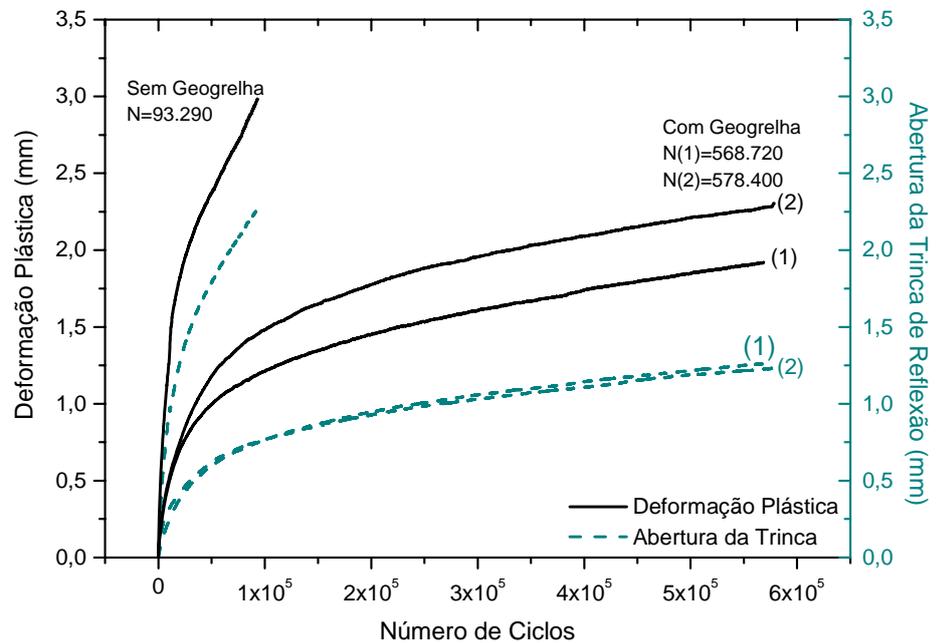


Figura 3.9 Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 3mm (Cisalhante).

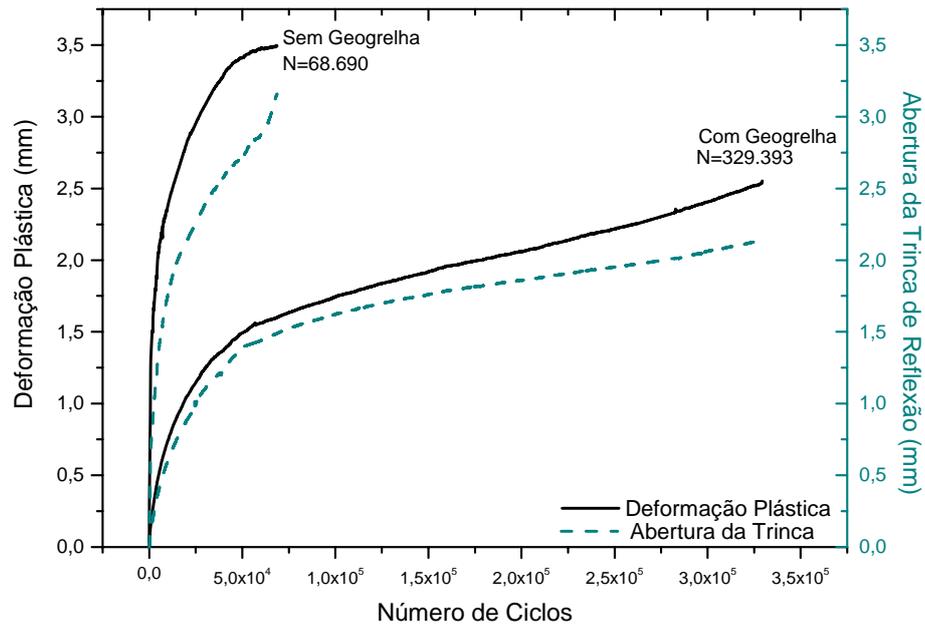


Figura 3.10 Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 6mm (Flexão).

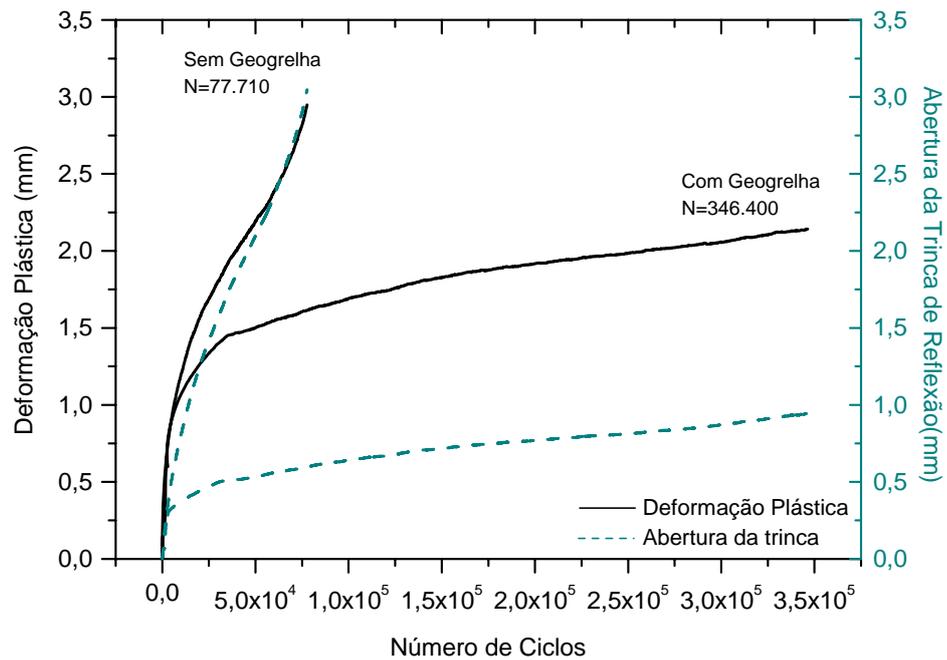


Figura 3.11 Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 6mm (Cisalhante).

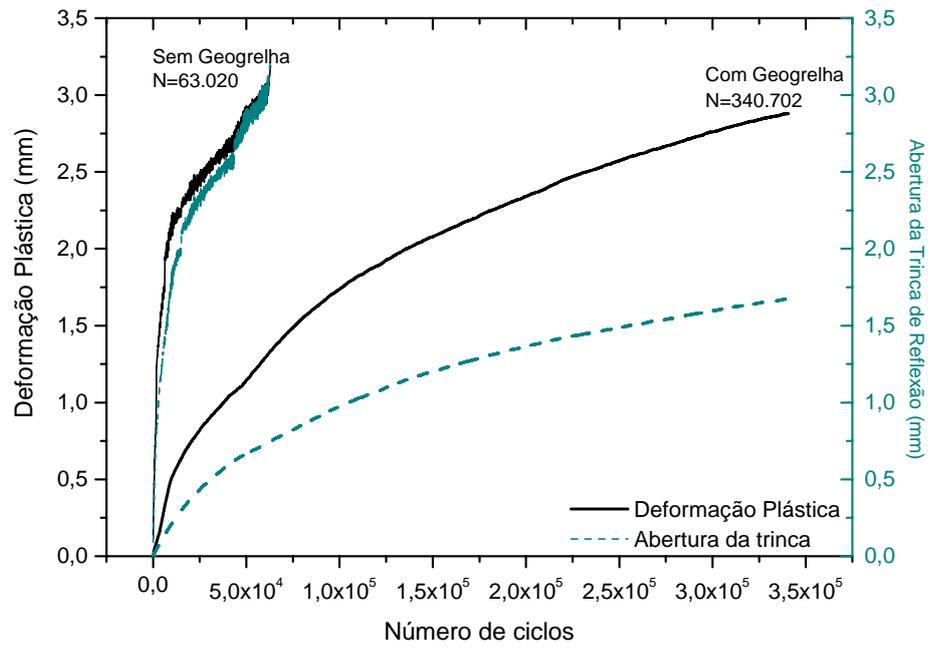


Figura 3.12 Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 9mm (Flexão).

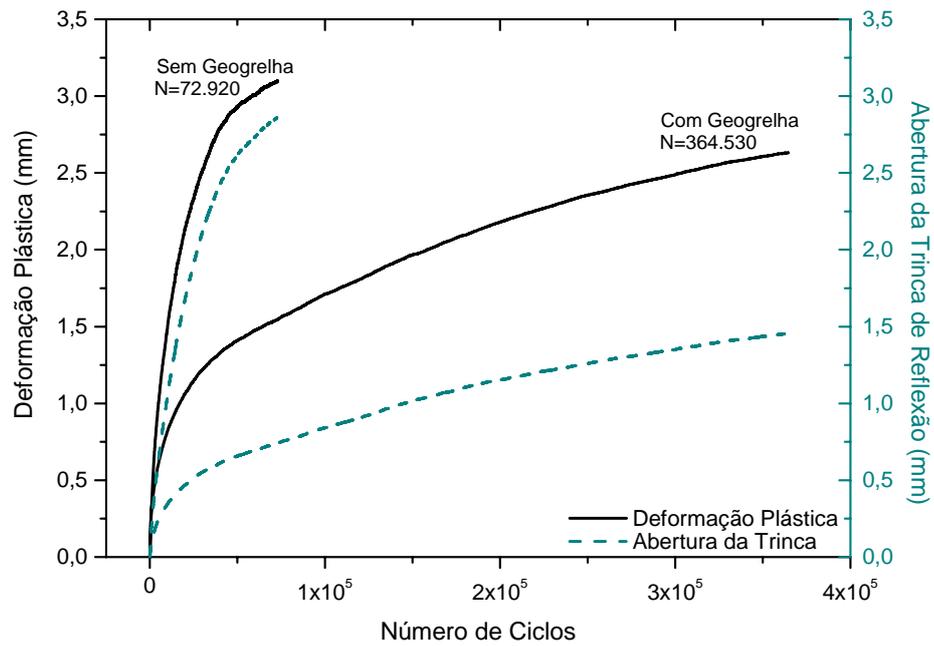


Figura 3.13 Resultado do ensaio de fadiga - Abertura da pré-trinca 9mm (Cisalhante).

3.2.4 Terceira Etapa

Os ensaios de fadiga nesta terceira etapa foram realizados com a geogrelha diretamente sobre a extremidade da trinca pré-formada com abertura de 3 mm. As dimensões das vigas são as mesmas citadas nas etapas anteriores.

Nos ensaios de fadiga que foram descritos anteriormente, as vigas ensaiadas com geogrelha não alcançaram o estado final de fratura pelos critérios de finalização dos ensaios já citados. Com a finalidade de conhecer o comportamento do sistema de reforço com geogrelha até a fratura dos corpos de prova, foram realizados, nesta terceira etapa, ensaios dinâmicos de fadiga com as mesmas características do ensaio descrito no item anterior. Foram ensaiadas apenas vigas com abertura da pré-trinca de 3 mm e com a aplicação da carga no Modo de Flexão. Ensaios no Modo Cisalhante não foram realizados uma vez que a presença da geogrelha reduz drasticamente a influência da posição da carga sobre a vida de fadiga. Esta conclusão foi extraída dos ensaios realizados anteriormente.

Nos ensaios foram utilizados três tipos de geogrelha. A primeira geogrelha (Tipo I) foi igual à dos ensaios anteriores (Hatelit C 40/17, com filamentos de poliéster) e as outras duas com as geogrelhas (Tipo II e Tipo III, família Hatelit Plus) produzidas a partir de filamentos de PVA (“polyvinyl alcohol”), material com maior módulo de elasticidade que o poliéster. Todas as geogrelhas apresentam uma abertura de malha de 40 mm, com as seguintes propriedades mecânicas nominais (valores fornecidos pelo fabricante):

- Tipo I: resistência à tração nominal: 50 kN/m; deformação máxima na ruptura: 11%
- Tipo II: resistência à tração nominal: 35 kN/m; deformação máxima na ruptura: 6%

- Tipo III: resistência à tração nominal: 50 kN/m; deformação máxima na ruptura: 6%

Assim como foi observado nos ensaios da segunda etapa, a inclusão da geogrelha restringiu o movimento de abertura da trinca de reflexão. Nos ensaios comparativos entre vigas com geogrelhas, verificou-se que o desempenho do concreto asfáltico reforçado com a geogrelha Tipo III foi significativamente superior, o que pode ser atribuído ao maior módulo de elasticidade desse material. O desempenho do concreto asfáltico reforçado com a geogrelha tipo II foi um pouco superior ao Tipo I, pelo mesmo motivo. As três geogrelhas ensaiadas não apresentaram degradação ou dano aparente por fadiga (após 1.000.000 de ciclos de carga e descarga).

Nesses ensaios, o fator de efetividade (FEG) calculado para a geogrelha Tipo I, considerando o estado terminal das vigas com e sem geogrelha, é da ordem de 10. Para as geogrelhas tipo II e tipo III os valores calculados de FEG são da ordem de 12 e 16, respectivamente.

As curvas (Figura 3.14 e 3.15) que mostram as deformações e aberturas de trinca para cada número de ciclo estão descritos a seguir.

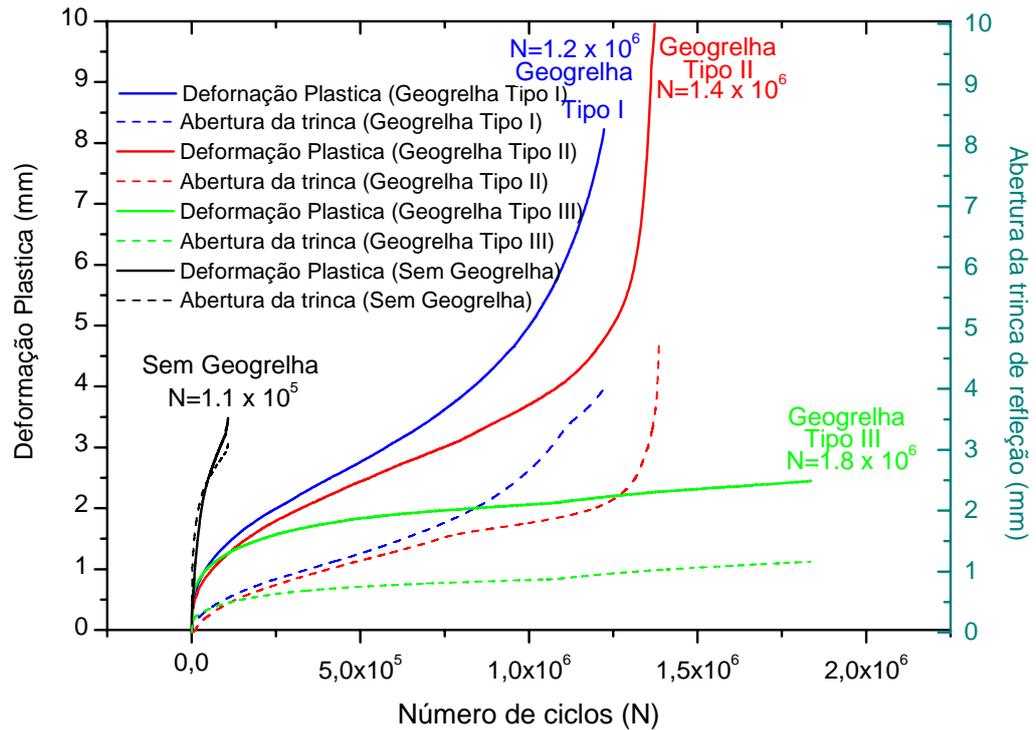


Figura 3.14 Resultado do ensaio de fadiga até a ruptura - abertura da pré-trinca 3mm.

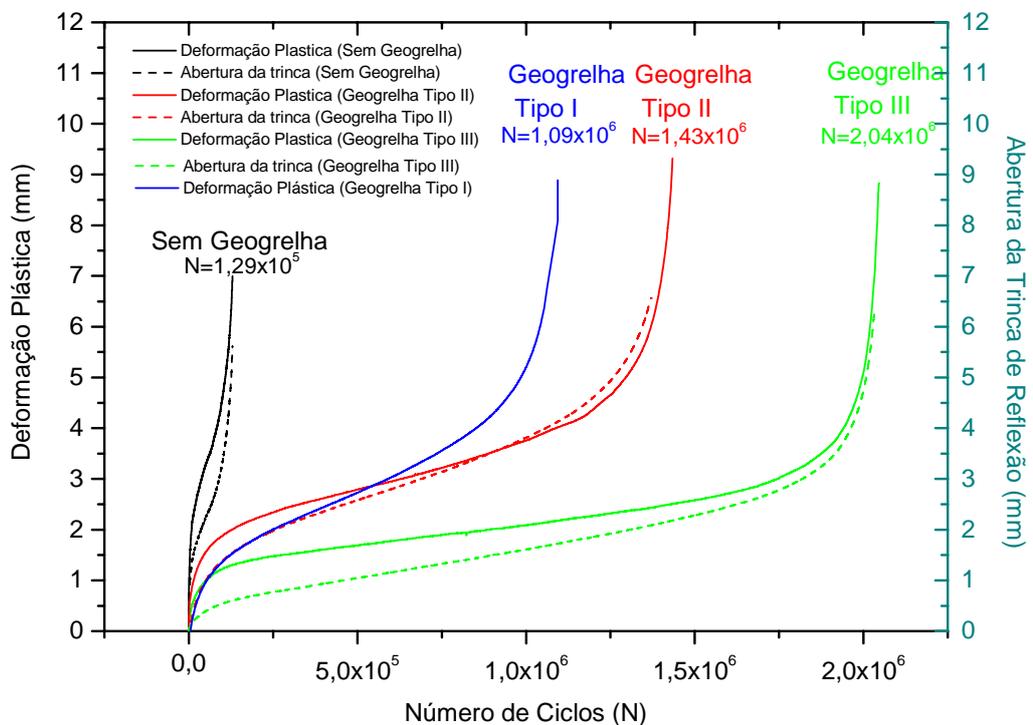


Figura 3.15 Resultado do ensaio de fadiga até a ruptura - abertura da pré-trinca 3mm.

3.3 Conclusões dos Ensaios de Fadiga

3.3.1 Modelo Mecânico para Projeto de Restauração de Pavimentos

Montestruque (2002) expressa um método para dimensionamento da espessura de camadas asfálticas aplicadas como recapeamento sobre pavimentos severamente trincados com a inclusão das camadas intermediárias especiais, o geotêxtil, estudado por Montestruque (1996), e a geogrelha, estudado por Montestruque (2002) e descrito nesta pesquisa. Para a geogrelha utilizada nos experimentos realizados, o fator de efetividade não mostrou qualquer tendência simples de variação com a carga aplicada ou com a abertura da trinca subjacente. Um fator de efetividade por volta de 4 parece constituir um valor razoável que pode ser sugerido para efeito de aplicações práticas. A inexistência de qualquer tendência marcante de variação do fator de efetividade da geogrelha com os parâmetros apontados sugere que o valor obtido dos ensaios pode ser aplicado diretamente às condições de solicitação a que uma camada asfáltica de recapeamento estará sujeita no campo.

Este método poderia consistir simplesmente da aplicação direta dos seguintes fatores à vida de fadiga prevista por um modelo de previsão de desempenho mecânico-empírico apropriado:

Geotêxtil:

Carga na posição de flexão: $F_f = 3,1$

Carga na posição cisalhante: $F_c = 1,4$

Geogrelha:

Carga na posição de flexão: $F_f = 5,4$

Carga na posição cisalhante: $F_c = 3,3$

Os fatores acima devem ser aplicados à resistência por fadiga N_f calculada em pontos selecionados ao longo da espessura da camada asfáltica por um modelo mecanístico-empírico consistente, que leve em conta o estado de tensões produzido pela carga de eixo considerada em cada um desses pontos. Esse modelo deve incluir uma simulação das trincas do pavimento subjacente pelo método dos elementos finitos. Um modelo dessa natureza é descrito em Rodrigues (2001), onde é apresentado o modelo Pavesys8 que prevê o desempenho de pavimentos restaurados por meio de recapeamento simples. A conclusão do método de dimensionamento proposto consistiu simplesmente da aplicação dos fatores acima à resistência a fadiga calculada pelo Pavesys8, ao longo da camada. Esta é dividida em 10 subcamadas e a vida de reflexão de trincas em cada subcamada i passa a ser calculada pela seguinte (Equação 3.3):

$$N_0 = N_f + \Delta N. \quad (3.3)$$

com N_f sendo estimado a partir de ensaios convencionais de fadiga a tensão controlada.

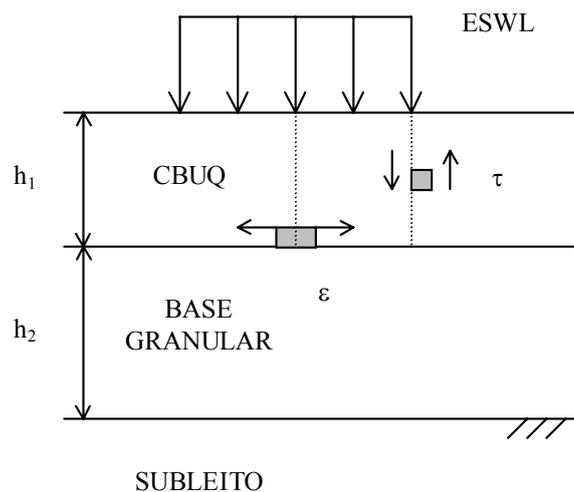


Figura 3.16 Solicitações críticas para o trincamento em revestimento asfáltico.

Assim

$$N_f (cf_1 + cf_2) = 1, \quad (3.4)$$

$$cf_1 = \frac{1}{K \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^n}, \quad (3.5)$$

$$cf_2 = \frac{2}{K \left(\frac{1}{U_d} \right)^{n/2}}. \quad (3.6)$$

Onde a resistência à fadiga sob tensões de cisalhamento é calculada a partir de leis de fadiga convencionais expressas pela densidade de energia de distorção (U_d).

A consideração feita de valores constantes para F_f e F_c se deve à ausência de qualquer tendência racional sistemática de variação desses parâmetros com a carga aplicada nos ensaios de fadiga ou com abertura da trinca subjacente.

Assim significa que o mesmo modelo pode ser utilizado, bastando apenas substituir o modelo estrutural da teoria de camadas elásticas por um modelo baseado no método dos elementos finitos, capaz de permitir a simulação das descontinuidades introduzidas pelas trincas existentes no pavimento antigo.

Nesta pesquisa realizou-se então a simulação pelo método dos elementos finitos dos ensaios de fadiga realizados. Obteve-se uma análise detalhada dos ensaios com o objetivo de se calcular as solicitações na região crítica da camada asfáltica de recapeamento, que é aquela situada imediatamente acima da trinca da camada subjacente. Foi escolhida a densidade de energia de distorção com esse fim, uma vez que ela se relaciona de forma estreita com a ruptura e por ser menos suscetível a imprecisões associadas ao refinamento da malha no método dos elementos finitos que parâmetros do tipo tensões e deformações.

Os resultados obtidos nos ensaios da pesquisa de Montestruque (2002), onde se mostra o número de ciclos de carga requerido N_f para o critério de ruptura da viga desejado, são correlacionados diretamente com os valores máximos de U_d calculados na simulação.

3.3.2 Vida de fadiga

No caso de uma camada asfáltica de recapeamento com geogrelha, aplicada sobre uma camada trincada, tem-se sua vida de fadiga incrementada pela ação da geogrelha em impedir a formação de uma única trinca de reflexão que monopolize a dissipação de energia em sua extremidade. Surgem muitas microfissuras, distribuídas sobre um volume maior dentro da camada, com padrão errático de propagação e cada uma sendo de crescimento lento. O grau de transferência de tensões ao longo das paredes de cada uma dessas microfissuras é elevado, o que auxilia na redução de sua velocidade de crescimento por atenuar a concentração de tensões em sua extremidade. A orientação errática das microfissuras também atua neste sentido, levando inclusive, à ocorrência de microfissuras que adquirem uma geométrica capaz de bloquear seu crescimento subsequente. As seguintes conseqüências advêm desse mecanismo:

- a) O pavimento permanece com elevado grau de impermeabilização, mesmo após o surgimento de trincas ter atingido a superfície, por serem as trincas mais fechadas e não interligadas;
- b) Um futuro recapeamento poderá ser feito diretamente sobre a camada asfáltica de recapeamento antiga, sem que haja preocupação quanto ao fenômeno do trincamento por reflexão, uma vez que as microfissuras subjacentes terão atividade baixa;

- c) O desempenho global do pavimento restaurado é melhorado, tanto devido ao atraso na reflexão das trincas subjacentes à camada asfáltica de recapeamento quanto devido à eliminação ou menor incidência de trincas severas na superfície, na medida em que trincas de baixa severidade se espalharam mais lentamente pela superfície do pavimento e não sofrem erosão de bordos ou desagregação.

Na Tabela 3.5, Montestruque (2002) obtém fatores de efetividade (FEG), variando entre 4,45 e 6,14 para a posição cisalhante e entre 4,79 e 6,14 para a posição de flexão, considerando aberturas de pré-trincas entre 3 a 9 mm sendo localizado a geogrelha diretamente sobre a extremidade da pré-trinca onde existe concentração das tensões. Os fatores de efetividade não mostraram qualquer tendência simples de variação com a carga aplicada ou com a abertura da trinca subjacente.

Utilizando-se, contudo, esses valores, Montestruque (2002) obteve um fator de efetividade ponderado por volta de 5. Este valor parece constituir um valor razoável que pode ser sugerido para efeito de aplicações práticas. A inexistência de qualquer tendência marcante de variação do FEG com os parâmetros apontados sugere que o valor obtido dos ensaios pode ser aplicado diretamente às condições de solicitação a que a uma camada asfáltica de recapeamento estará sujeita no campo.

3.4 Utilização dos Resultados dos Ensaios de Fadiga

Dos resultados de ensaios de laboratório (fadiga no MTS), obtidos na pesquisa de Montestruque (2002), foram utilizados neste trabalho os valores dos números de ciclos de carga (N_f) requerido para o critério de ruptura da viga desejado, considerando o modo de flexão e cisalhamento, em cada etapa de ensaio.

Utilizando os mesmos dados dos ensaios como entrada de dados, referentes à geometria da viga, tipo de carregamento, propriedades do concreto asfáltico, borracha e geogrelha, e às condições de apoio foi possível realizar as simulações pelo software MSC/NASTRAN, como pode ser visto no decorrer do Capítulo 4. Os resultados das simulações foram os valores da densidade de energia de distorção (U_d).

Foram traçadas correlações entre os resultados experimentais e os obtidos numericamente.

Os ensaios foram simulados pelo método dos elementos finitos, com o objetivo de se calcular as solicitações na região crítica da camada de concreto asfáltico, que é aquela situada imediatamente acima da trinca da camada subjacente.

Utilizando esses resultados foi possível interpretar os efeitos da presença da camada intermediária em termos de alteração do estado de tensões na camada asfáltica de recapeamento.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Geometria da Viga e Material Utilizado

Neste capítulo apresentam-se as propriedades dos materiais, os modelos de elementos finitos e os resultados numéricos obtidos para as vigas ensaiadas por Montestruque (2002).

A Figura 4.1 mostra um esboço genérico de uma viga ensaiada por Montestruque (2002). A viga tem 75 mm de largura, 170 mm de altura, 460 mm de comprimento e é reforçada por uma geogrelha de 2,0 mm de espessura inserida a d_1 da extremidade da trinca. A viga é apoiada continuamente sobre uma base de borracha de 20 mm de espessura.

Para se obter a trinca com dimensões iniciais $d_2 \times 35 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ é deixada uma região de $12 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ livre para acesso.

São utilizados dois diferentes valores para a distância d_1 da geogrelha para a extremidade da trinca (0 e 20 mm) e três diferentes valores para a abertura d_2 da trinca (3, 6 e 9 mm).

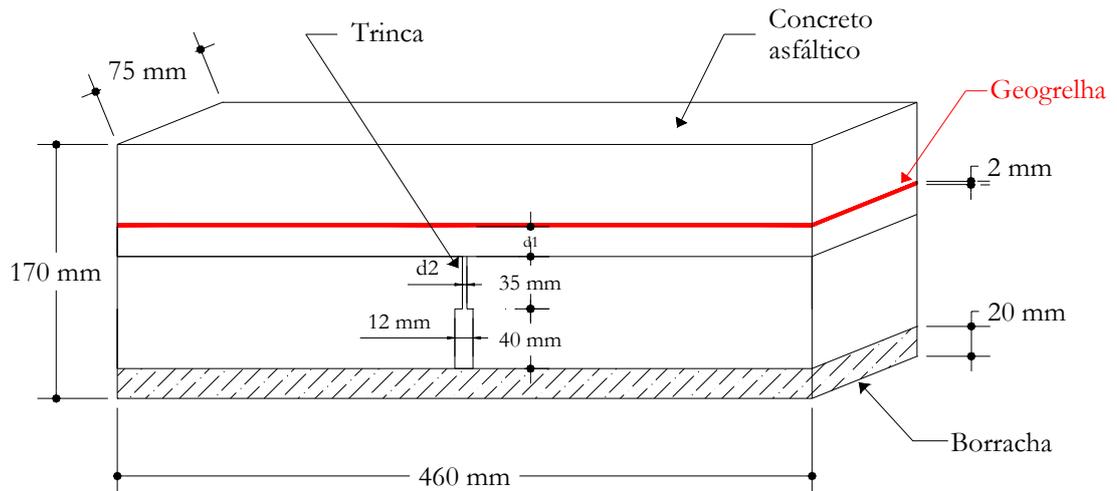


Figura 4.1 Viga ensaiada por Montestruque (2002).

Os materiais são todos considerados homogêneos, isotrópicos e elásticos lineares, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Propriedades dos materiais que compõem a viga (Montestruque, 2002).

Material	Módulo de Elasticidade (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Concreto Asfáltico	40000	0,33
Borracha	500	0,30
Geogrelha	Tipo I – 454540 Tipo II – 583333 Tipo III - 833333	0,30

4.2 Modelagem por Elementos Finitos

A viga da Figura 4.1 é analisada por elementos finitos considerando apenas metade da estrutura. Isso é possível porque a geometria (incluindo as condições de contorno) e as propriedades elásticas são simétricas em relação ao plano médio perpendicular ao eixo da viga.

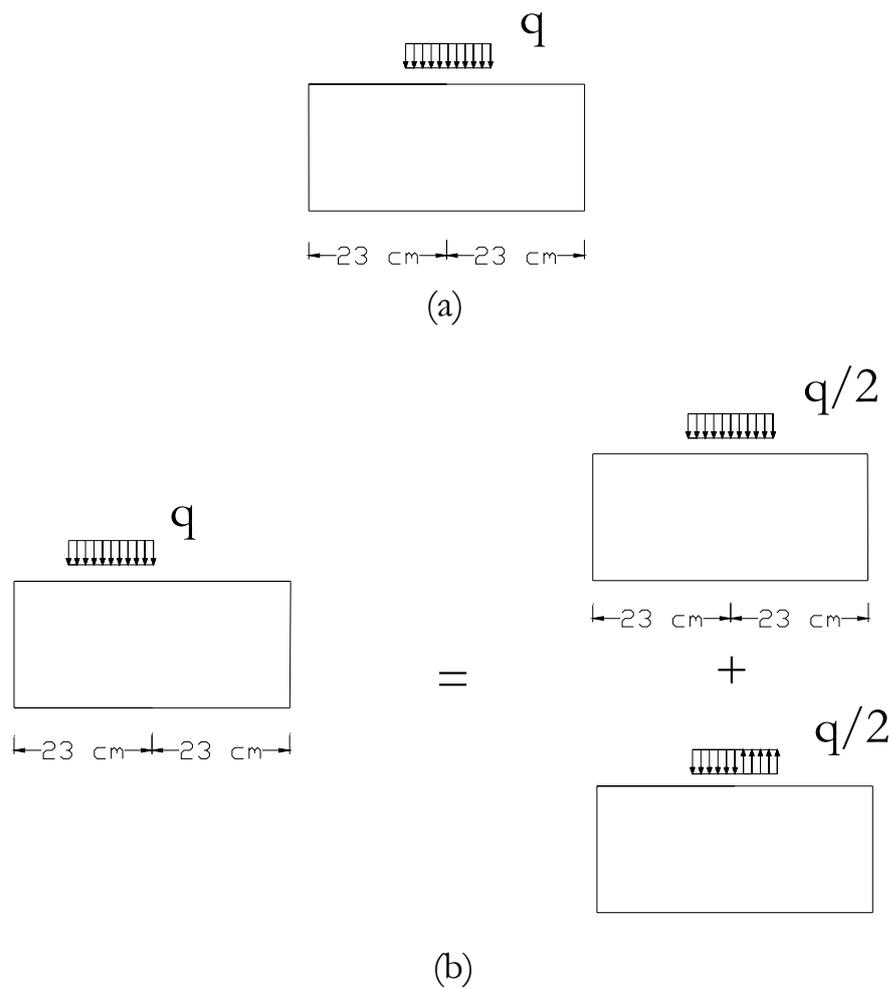


Figura 4.2 Viga sob carga que induz: (a) flexão; (b) cisalhamento.

As cargas aplicadas simulam a passagem de uma roda sobre o pavimento. Montestruque (2002) utiliza as pressões de 5,49; 4,245; 3,265 kgf/cm² posicionadas de forma a sollicitar a região em torno da trinca à flexão e a cisalhamento. A Figura 4.2 mostra um esboço da viga com os dois tipos de carregamento.

A análise da viga sujeita à carga que induz flexão (Figura 4.2 (a)) é substituída pela análise de metade da estrutura, impondo condições de simetria em relação ao plano central, economizando-se assim tempo de processamento.

Sob a carga que induz cisalhamento (Figura 4.2 (b)), a análise da viga é substituída por duas análises de metade da estrutura, reduzindo a carga à metade e impondo numa das análises condições de simetria em relação ao plano central e na outra análise condições de anti-simetria. Os resultados obtidos das duas análises são, posteriormente, adicionados. Isso é possível devido ao fato de ser o problema linear. A vantagem desse procedimento é a utilização da mesma discretização de metade da viga para as análises com os dois tipos de carregamentos.

Dois tipos de elementos são utilizados. O concreto asfáltico e a camada de borracha são modelados como placa, usando o elemento QUAD4, e a geogrelha como barra, usando o elemento BAR.

Um maior número de elementos é posicionado em torno da extremidade da trinca onde se espera grandes gradientes de tensão. A viga é, então, dividida em dezesseis regiões, como mostra a Figura 4.3 para a trinca de 3 mm, indicando-se para cada uma delas o número adotado de elementos por direção e suas dimensões relativas. Alguns testes de convergência (item 4.3) foram realizados em relação a valores de tensões para a definição dessa malha.

A região retangular superior esquerda, por exemplo, é dividida horizontalmente em 190 elementos QUAD4 de mesma dimensão (190 elementos 1:1) e verticalmente em 75 elementos cujas dimensões variam uniformemente na razão de 4 para 1 (75 elementos 4:1). Ou seja, um elemento posicionado na parte superior do retângulo terá seus lados verticais quatro vezes maiores do que os de um elemento posicionado na parte inferior. O mesmo raciocínio aplica-se para as demais regiões, bastando seguir a indicação das setas.

Para a trinca de 6 mm e 9 mm, muda-se a malha apenas nos retângulos a, b e c, em torno da trinca. Assim, um total de 38900 elementos QUAD4 são utilizados para a viga com a trinca de 3 mm, 38755 elementos para a trinca de 6 mm e 38795 para a trinca de 9 mm.

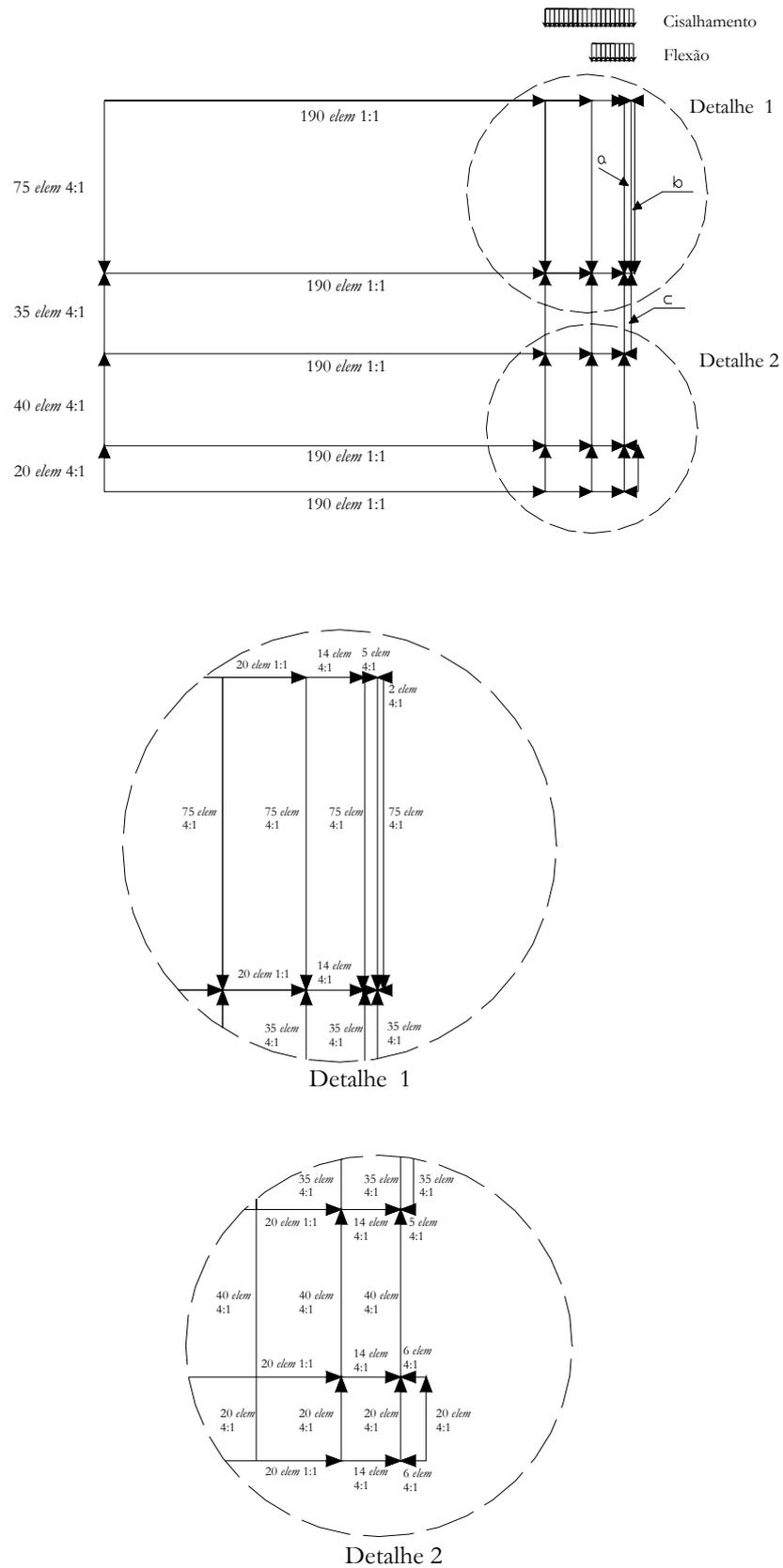


Figura 4.3 Malha adotada para a metade da viga com trinca de 3 mm de abertura.

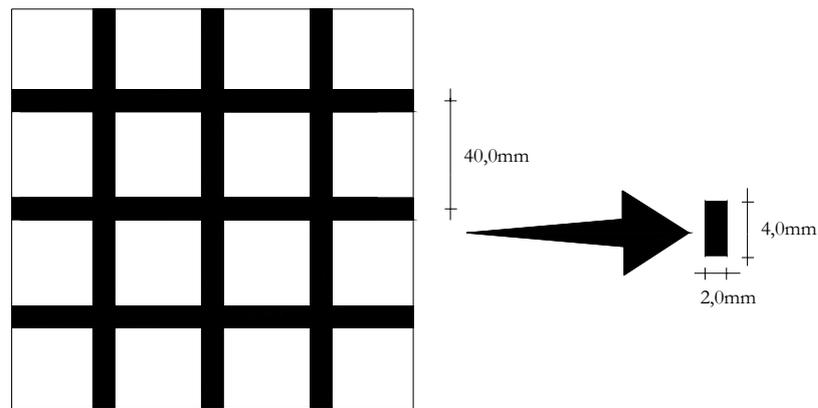


Figura 4.4 Detalhe da geogrelha.

O número de elementos BAR utilizado na modelagem da geogrelha segue o mesmo número de elementos QUAD4 da região naquela direção. Os nós da geogrelha sofrem os mesmos deslocamentos dos nós dos elementos QUAD4 adjacentes, pois se considera uma perfeita aderência entre os materiais nesses pontos. Utiliza-se um total de 231 elementos BAR para a viga com a trinca de 3 mm e 230 elementos para a viga com a trinca de 6 mm e 9 mm.

A geometria da geogrelha utilizada nos ensaios é mostrada em detalhe na Figura 4.4. A largura de 75 mm da viga permite que somente duas tiras longitudinais da geogrelha sejam efetivamente usadas como reforço. Assim, na simulação numérica considera-se que a geogrelha tenha seção transversal retangular com altura igual à própria espessura da geogrelha (2 mm) e largura igual a duas vezes a largura de uma tira longitudinal ($2 \times 4 = 8$ mm). A geogrelha não é solicitada à compressão, como deveria, na simulação numérica.

4.3 Teste de convergência

Os valores das tensões foram ajustados de forma a obter o mesmo valor a cada divisão da malha. Realizou-se este refinamento até obter um valor próximo de tensões.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores das tensões de vonMises em oito pontos determinados na viga para cada espaçamento.

Tabela 4.2 Valores de tensões de vonMises obtidos em pontos da viga.

Espaçamento(cm)	Pontos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,20	3,936	5,526	1,523	3,513	3,870	0,213	5,424	0,245
0,10	3,991	5,492	0,228	4,959	5,015	0,125	7,196	0,075
0,05	3,956	5,487	0,124	5,155	6,010	0,057	9,032	0,002

Nota-se que os valores das tensões nos pontos 1 e 2 sofrem pequenas muitas mudanças com o refinamento dos elementos. Já nos demais pontos os valores sofrem algumas variações. Ocorre um aumento nos valores das tensões, com o aumento dos números de elementos, nos pontos próximos da trinca. Nestes pontos as tensões são infinitas.

Para definir o número de elementos que foi utilizado na análise, adotou-se os pontos mais distantes das trincas e verificou-se que os valores das tensões não variavam muito conforme as malhas eram mais refinadas, a partir dos valores de espaçamentos de 0,10 cm. Assim, discretizou-se a malha com os espaçamentos dos elementos de 0,10 cm e geraram-se malhas mais refinadas nas zonas de maior interesse nas análises (proximidades da trinca).

4.4 Resultados das simulações

Procura-se nas simulações numéricas determinar a densidade máxima de energia de distorção na viga sob as diversas situações de carregamento, abertura de trinca e presença ou não do reforço. A densidade de energia de distorção pode ser dada em função das tensões principais ou da tensão de von Mises como segue:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \\
 &= \frac{1+\nu}{3E} \left(\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \right)^2 \quad (4.1) \\
 &= \frac{1+\nu}{3E} (\text{tensão de von Mises})^2.
 \end{aligned}$$

A tensão de von Mises já se encontra predefinida no MSC/NASTRAN. A função U é então inserida no software, conforme explicado no Apêndice A, em termos da tensão de von Mises.

As simulações numéricas são divididas em três etapas, seguindo a mesma nomenclatura adotada nos ensaios. A densidade máxima de energia de distorção é identificada por U_B ou U_S , dependendo se a carga induz flexão ou cisalhamento na região da extremidade da trinca. Os valores das densidades de energia de distorção são obtidos na condição inicial de carregamento.

4.4.1 Primeira Etapa (trinca: 3 mm; geogrelha a 20 mm da extremidade da trinca)

Nesta etapa, em que a geogrelha passa a 20 mm acima da extremidade da trinca, a densidade máxima de energia de distorção ocorre no centro do elemento E_1 (Tabela 4.2), quando os resultados são avaliados em nível dos elementos, e na extremidade da trinca

(Tabela 4.3), ou seja, no nó inferior direito do elemento E_1 , quando resultados nodais são avaliados. Com base no procedimento de cálculo de tensão adotado pelo Nastran, a análise em nível de elemento é mais interessante.

A Figura 4.5 mostra a região da viga em torno da extremidade da trinca, da qual observa-se que a densidade máxima de energia de distorção para a pressão de $5,49 \text{ kgf/cm}^2$ à flexão (e também para as demais cargas) ocorre no elemento E_1 (em destaque).

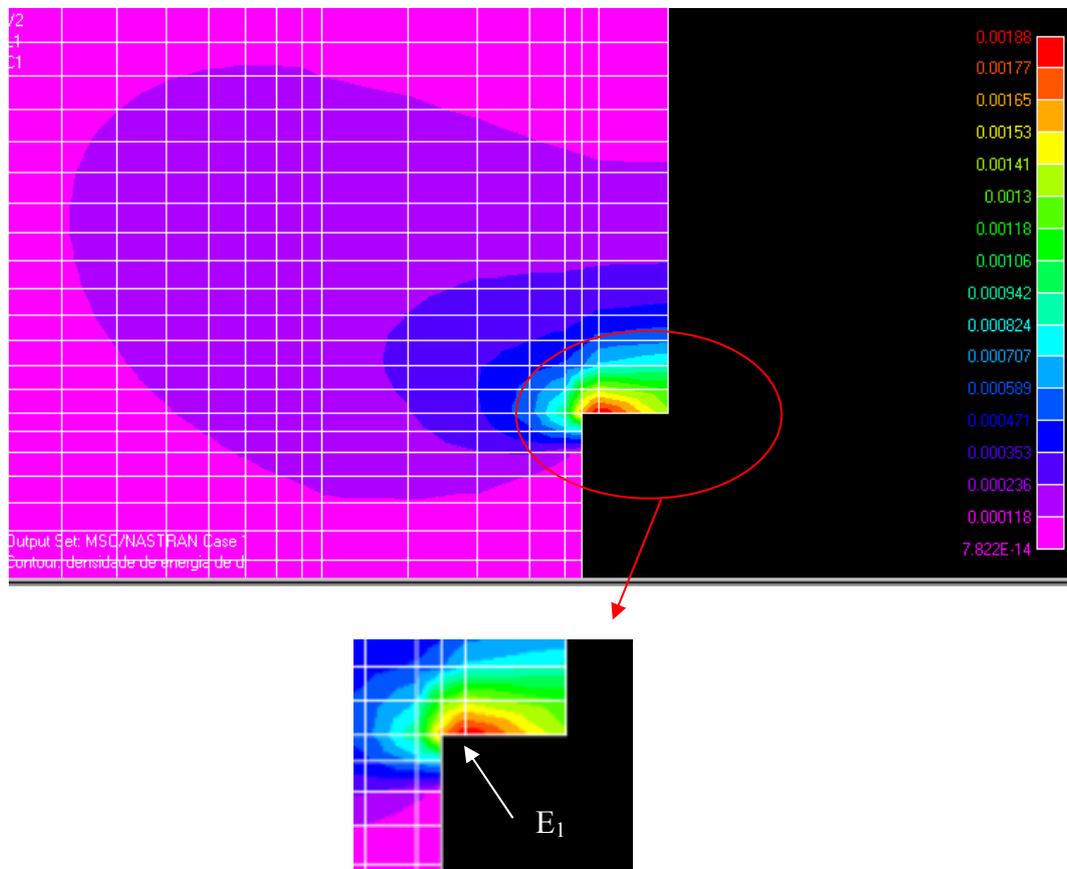


Figura 4.5 Densidade de energia de distorção em torno da extremidade da trinca para a pressão de $5,49 \text{ kgf/cm}^2$ à flexão.

Tabela 4.3 Densidade de energia de distorção (kgf/cm²) no centro do elemento E₁ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.

Sem geogrelha				
Pressão (kgf/cm ²)	Centro do elemento E ₁		20 mm acima da extremidade da trinca*	
	U _B	U _S	U _B	U _S
5,49	4,287E-03	5,203E-03	1,233E-04	1,062E-04
4,245	2,586E-03	3,139E-03	7,457E-05	6,414E-05
3,265	1,504E-03	1,825E-03	4,336E-05	3,729E-05
Com geogrelha				
Pressão (kgf/cm ²)	Centro do elemento E ₁		20 mm acima da extremidade da trinca	
	U _B	U _S	U _B	U _S
5,49	4,164E-03	5,080E-03	1,195E-04	1,028E-04
	(2,87%)**	(2,36%)	(3,08%)	(3,20%)
4,245	2,510E-03	3,065E-03	7,208E-05	6,206E-05
	(2,94%)	(2,36%)	(3,34%)	(3,24%)
3,265	1,460E-03	1,783E-03	4,191E-05	3,600E-05
	(2,93%)	(2,30%)	(3,34%)	(3,46%)

* Valor máximo da energia de distorção entre os elementos adjacentes a geogrelha (medida obtida no centro de um elemento).

**
$$\frac{\text{energia de distorção com geogrelha} - \text{energia de distorção sem geogrelha}}{\text{energia de distorção sem geogrelha}} \times 100$$

Tabela 4.4 Densidade de energia de distorção (kgf/cm^2) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.

Sem geogrelha				
Pressão (kgf/cm^2)	Extremidade da trinca		20 mm acima da extremidade da trinca*	
	U_B	U_S	U_B	U_S
5,49	3,304E-03	3,674E-03	1,226E-04	1,062E-04
4,245	1,993E-03	2,216E-03	7,422E-05	6,406E-05
3,265	1,159E-03	1,288E-03	4,315E-05	3,724E-05
Com geogrelha				
Pressão (kgf/cm^2)	Extremidade da trinca		20 mm acima da extremidade da trinca	
	U_B	U_S	U_B	U_S
5,49	3,208E-03 (2,90%)**	3,584E-03 (2,45%)	1,126E-04 (8,16%)	9,645E-05 (9,18%)
4,245	1,935E-03 (2,91%)	2,162E-03 (2,44%)	6,795E-05 (8,45%)	5,818E-05 (9,18%)
3,265	1,125E-03 (2,93%)	1,240E-03 (2,95%)	3,950E-05 (8,46%)	3,383E-05 (9,16%)

* Valor máximo da energia de distorção medida em um nó da geogrelha aproximadamente a 20 mm acima da extremidade da trinca.

** $\frac{\text{energia de distorção com geogrelha} - \text{energia de distorção sem geogrelha}}{\text{energia de distorção sem geogrelha}} \times 100$

4.4.2 Segunda Etapa (pressão: 5,49 kgf/cm²; geogrelha exatamente na extremidade da trinca)

Nesta etapa, em que a geogrelha passa exatamente na extremidade da trinca, a densidade máxima de energia de distorção é medida ora no centro do elemento E₂ (Tabela 4.4) ora na extremidade da trinca (Tabela 4.5), ou seja, no nó inferior direito do elemento E₂, conforme explicado na Primeira Etapa. Para o caso sem geogrelha, foi medida a densidade de energia de distorção no centro do elemento E₂, para comparar com o caso com geogrelha.

A Figura 4.6 mostra a região da viga em torno da extremidade da trinca, da qual observa-se que a densidade máxima de energia de distorção para a trinca de 3 mm (e também para as demais trincas) ocorre no elemento E₂ (em destaque).

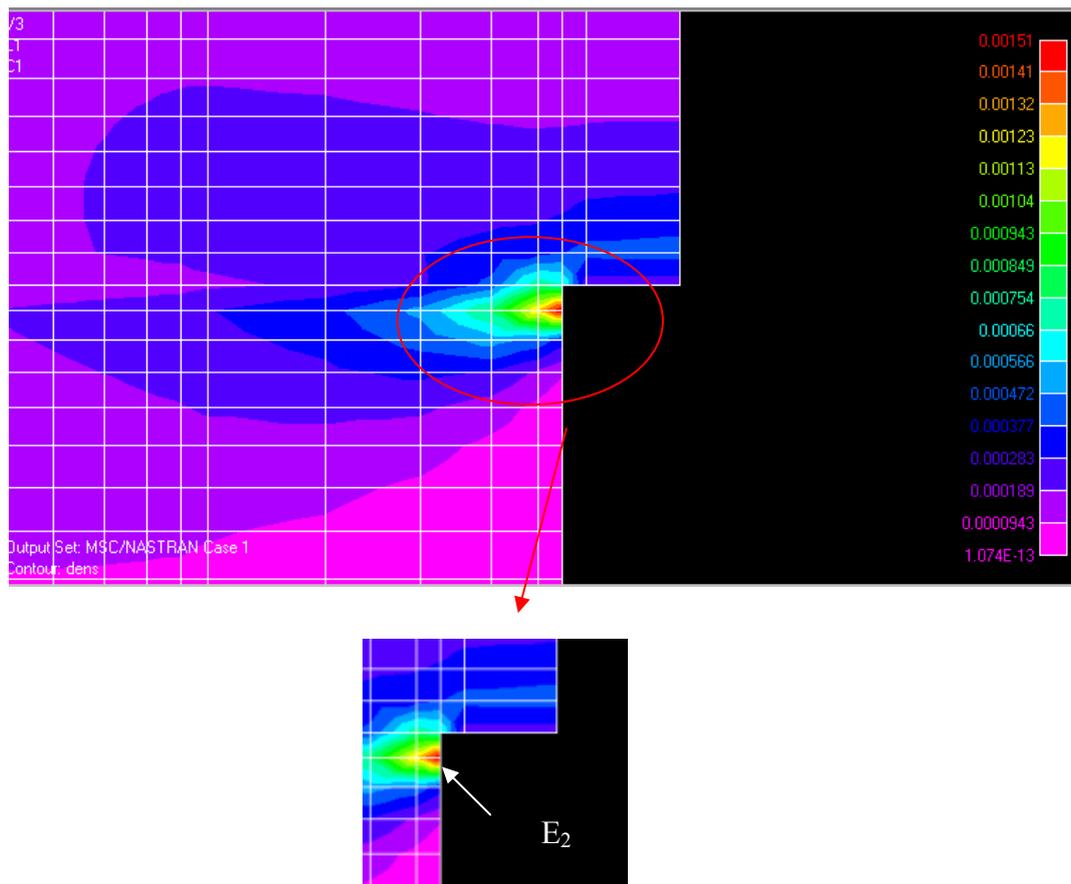


Figura 4.6 Densidade de energia de distorção em torno da extremidade da trinca para a abertura de trinca de 3 mm.

Tabela 4.5 Densidade de energia de distorção (kgf/cm^2) no centro do elemento E_2 e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.

Sem geogrelha				
Trinca (mm)	Centro do elemento E_2		20 mm acima da extremidade da trinca*	
	U_B	U_S	U_B	U_S
3	4,287E-03	5,203E-03	1,233E-04	1,062E-04
6	2,842E-03	3,887E-03	1,135E-04	1,028E-04
9	2,716E-03	3,816E-03	1,268E-04	1,091E-04
Com geogrelha				
Trinca (mm)	Centro do elemento E_2		20 mm acima da extremidade da trinca	
	U_B	U_S	U_B	U_S
3	2,930E-03 (31,65%)**	4,439E-03 (14,68%)	1,153E-04 (6,49%)	1,011E-04 (4,80%)
6	2,174E-03 (23,50%)	3,652E-03 (6,04%)	1,055E-04 (7,05%)	9,769E-05 (4,97%)
9	2,121E-03 (21,91%)	3,006E-03 (21,22%)	1,177E-04 (7,17%)	1,031E-04 (5,04%)

Sem geogrelha		
Trinca (mm)	Centro do elemento E_2	
	U_B	U_S
3	2,307E-03	3,403E-03
6	1,667E-03	2,537E-03
9	1,512E-03	2,602E-03

* Valor máximo da energia de distorção entre os elementos adjacentes a geogrelha (medida obtida no centro de um elemento).

** $\frac{\text{energia de distorção com geogrelha} - \text{energia de distorção sem geogrelha}}{\text{energia de distorção sem geogrelha}} \times 100$

Tabela 4.6 Densidade de energia de distorção (kgf/cm²) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.

Sem geogrelha				
Trinca (mm)	Extremidade da trinca		20 mm acima da extremidade da trinca*	
	U _B	U _S	U _B	U _S
3	3,304E-03	3,674E-03	1,226E-04	1,062E-04
6	2,174E-03	2,758E-03	1,128E-04	1,027E-04
9	2,153E-03	2,827E-03	1,261E-04	1,089E-04
Com geogrelha				
Trinca (mm)	Extremidade da trinca		20 mm acima da extremidade da trinca	
	U _B	U _S	U _B	U _S
3	1,702E-03 (48,48%)**	2,772E-03 (24,55%)	1,149E-04 (6,28%)	1,009E-04 (4,99%)
6	1,256E-03 (42,23%)	2,266E-03 (17,83%)	1,052E-04 (6,73%)	9,748E-05 (5,08%)
9	1,168E-03 (45,75%)	1,717E-03 (39,26%)	1,173E-04 (6,98%)	1,021E-04 (6,24%)

* Valor máximo da energia de distorção medida em um nó da geogrelha aproximadamente a 20 mm acima da extremidade da trinca.

**
$$\frac{\text{energia de distorção com geogrelha} - \text{energia de distorção sem geogrelha}}{\text{energia de distorção sem geogrelha}} \times 100$$

4.4.3 Terceira Etapa (trinca: 3 mm; geogrelha exatamente na extremidade da trinca; pressão: 5,49 kgf/cm²)

Nesta etapa, em que a geogrelha passa exatamente na extremidade da trinca, reproduz-se o experimento numérico da Segunda Etapa para três diferentes tipos de geogrelha, porém fixando a abertura da trinca em 3 mm e a pressão em 5,49 kgf/cm² à flexão. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.7 Densidade de energia de distorção (kgf/cm²) no centro do elemento E₂ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.

Sem geogrelha		
	Centro do elemento E ₂	20 mm acima da extremidade da trinca*
	U _B 4,287E-03	U _B 1,233E-04
Com geogrelha		
Tipo	Centro do elemento E ₂	20 mm acima da extremidade da trinca
	U _B	U _B
I	2,930E-03 (31,65%)**	1,153E-04 (6,49%)
II	2,805E-03 (34,57%)	1,136E-04 (7,87%)
III	2,574E-03 (39,96%)	1,108E-04 (10,14%)

* Valor máximo da energia de distorção entre os elementos adjacentes a geogrelha (medida obtida no centro de um elemento).

** $\frac{\text{energia de distorção com geogrelha} - \text{energia de distorção sem geogrelha}}{\text{energia de distorção sem geogrelha}} \times 100$

Tabela 4.8 Densidade de energia de distorção (kgf/cm²) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca.

Sem geogrelha		
	Extremidade da trinca	20 mm acima da extremidade da trinca*
	U _B 3,304E-03	U _B 1,226E-04
Com geogrelha		
Tipo	Extremidade da trinca	20 mm acima da extremidade da trinca
	U _B	U _B
I	1,702E-03 (48,48%)**	1,149E-04 (6,25%)
II	1,648E-03 (50,12%)	1,139E-04 (7,09%)
III	1,540E-03 (53,39%)	1,106E-04 (9,79%)

* Valor máximo da energia de distorção medida em um nó da geogrelha aproximadamente a 20 mm acima da extremidade da trinca.

**
$$\frac{\text{energia de distorção com geogrelha} - \text{energia de distorção sem geogrelha}}{\text{energia de distorção sem geogrelha}} \times 100$$

Na *primeira etapa*, analisando o valor máximo de U na extremidade da trinca e a 20 mm desta, obtém-se, uma diminuição do valor da densidade de energia de distorção com o decréscimo da carga aplicada. Mas verifica-se que o valor de U (no caso da viga com a geogrelha) é próximo daquele determinado quando não se usou a geogrelha.

Na *segunda e terceira etapa*, a diferença entre os valores de U (no caso da viga com a geogrelha e sem a geogrelha) foi maior que na primeira etapa, para as três diferentes aberturas de trinca (segunda etapa) e para os três diferentes tipos de geogrelhas (terceira etapa).

4.5 Relação entre U_d e N_f

4.5.1 Introdução

A fim de se investigar o que ocorreu em termos de aumento da vida de reflexão de trinca com a inclusão da camada intermediária de geogrelha, correlacionou-se diretamente o número de ciclos de carga requerido N_f , obtido através do ensaio e descrito no Capítulo 3, com o valor máximo da densidade de energia de distorção U , na extremidade e a 20 mm da extremidade da trinca. Assim, obteve-se a relação entre os valores U simulados, com os valores de N_f , obtidos no ensaio. As condições de carregamento foram diferentes. Na simulação os valores foram obtidos na condição inicial de carregamento e no ensaio na condição final. A idéia foi verificar se já na condição inicial de carregamento correria alguma mudança do estado no estado de tensão.

Quando se trata de resultados de ensaios de fadiga à flexão realizada a tensão controlada em vigas bi-apoiadas, o número de ciclos N_0 de certa deformação máxima de tração ε_t que leva o corpo de prova à ruptura pode ser expresso por meio de modelos fenomenológicos da forma:

$$N_0 = K \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n. \quad (4.2)$$

Tendo em vista que as condições de solicitação nesses ensaios são bastante severas (vigas bi-apoiadas) e que não há uma propagação de trincas significativa (o ensaio termina praticamente quando uma trinca se torna visível na parte inferior da viga), devem-se

considerar seus resultados como indicadores do número de ciclos de carga para que ocorra a fratura do material betuminoso na região crítica (aquela onde atua a deformação de tração ϵ_t).

Os ensaios de reflexão de trincas realizados em vigotas apoiadas em base elástica podem ser interpretados através de correlações da forma:

$$N_f = K \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^n. \quad (4.3)$$

A densidade de energia de distorção pode ser expressa por:

$$U_d = \frac{1+\nu}{6E} [\sigma_t^2 x^2] = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_t^2, \quad (4.4)$$

$$\sigma_t = \left[\frac{3E}{1+\nu} U_d \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.5)$$

Substituindo 4.5 em 4.3, tem-se:

$$N_f = K \left[\frac{1+\nu}{3E} x \frac{1}{U_d} \right]^{\frac{n}{2}} \quad (4.6)$$

$$N_f = \left(\frac{1+\nu}{3E} \right)^{\frac{n}{2}} x \left(\frac{1}{U_d} \right)^{\frac{n}{2}}. \quad (4.7)$$

A fim de se investigar o que ocorreu em termos de aumento da vida de reflexão de trincas com a inclusão da geogrelha, pode-se calcular o seguinte parâmetro:

$$RN = \frac{N_f^R}{N_f^{SR}}, \quad (4.8)$$

que é a relação entre a vida de reflexão de trincas com a inclusão da geogrelha (N_f^R) e aquela prevista sem o uso da geogrelha (N_f^{SR}), recapeamento simples.

Sendo $n = 4$, substituído na equação 4.7, e correlacionando com a equação 4.8, tem-se:

$$\left(\frac{U_d^{SR}}{U_d^R} \right)^2 = \frac{N_f^R}{N_f^{SR}}. \quad (4.9)$$

Nas tabelas a seguir, as colunas codificadas por (RU) referem-se ao primeiro termo da equação 4.9, enquanto que os indicados por (RN) referem-se ao segundo termo da equação cujos valores são extraídos dos ensaios de Montestruque, 2002.

4.5.2 Primeira Etapa

Tabela 4.9 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) no centro do elemento E_1 e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca de 3 mm e geogrelha a 20 mm da extremidade da trinca).

Pressão (kgf/cm ²)	Relação entre Ud e Nf							
	Centro do elemento E_1				20 mm acima da extremidade da trinca			
	Flexão		Cisalhante		Flexão		Cisalhante	
	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)
5,49	1,029	3,74	1,034	2,06	1,031	3,74	1,033	2,06
4,245	1,030	4,19	1,034	3,54	1,034	4,19	1,036	3,54
3,265	1,030	4,60	1,034	3,06	1,035	4,60	1,036	3,06

Tabela 4.10 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca de 3 mm e geogrelha a 20 mm da extremidade da trinca).

	Relação entre Ud e Nf							
	Extremidade da trinca				20 mm acima da extremidade da trinca			
	Flexão		Cisalhante		Flexão		Cisalhante	
Pressão (kgf/cm ²)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)
5,49	1,030	3,74	1,025	2,06	1,187	3,74	1,206	2,06
4,245	1,030	4,19	1,025	3,54	1,186	4,19	1,212	3,54
3,265	1,030	4,60	1,030	3,06	1,186	4,60	1,205	3,06

4.5.3 Segunda Etapa

Tabela 4.11 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) no centro do elemento E₂ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (pressão: 5,49 kgf/cm²; geogrelha exatamente na extremidade da trinca).

	Relação entre Ud e Nf							
	Centro do elemento E ₂				20 mm acima da extremidade da trinca			
	Flexão		Cisalhante		Flexão		Cisalhante	
Trinca (mm)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)
3	1,46	6,14	1,17	6,15	1,07	6,14	1,05	6,15
6	1,31	4,80	1,06	4,46	1,07	4,80	1,05	4,46
9	1,28	5,41	1,27	5,00	1,08	5,41	1,06	5,00

Tabela 4.12 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (pressão: 5,49 kgf/cm²; geogrelha exatamente na extremidade da trinca).

Trinca (mm)	Relação entre Ud e Nf							
	Extremidade da trinca				20 mm acima da extremidade da trinca			
	Flexão		Cisalhante		Flexão		Cisalhante	
	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)
3	1,94	6,14	1,32	6,15	1,07	6,14	1,05	6,15
6	1,73	4,80	1,22	4,46	1,07	4,80	1,05	4,46
9	1,84	5,41	1,32	5,00	1,07	5,41	1,06	5,00

4.5.4 Terceira Etapa

Tabela 4.13 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) no centro do elemento E₂ e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca: 3 mm; geogrelha exatamente na extremidade da trinca; pressão: 5,49 kgf/cm²).

Tipo	Relação entre Ud e Nf			
	Centro do elemento E ₂		20 mm acima da extremidade da trinca	
	Flexão		Flexão	
	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)
I	1,46	10,91	1,07	10,91
II	1,53	12,73	1,08	12,73
III	1,66	16,36	1,13	16,36

Tabela 4.14 Valores da relação entre a densidade de energia de distorção (kgf cm) na extremidade da trinca e, aproximadamente, a 20 mm acima da extremidade da trinca e a vida de fadiga (trinca: 3 mm; geogrelha exatamente na extremidade da trinca; pressão: 5,49 kgf/cm²).

Tipo	Relação entre Ud e Nf			
	Extremidade da trinca		20 mm acima da extremidade da trinca	
	Flexão		Flexão	
	(RU)	(RN)	(RU)	(RN)
I	1,94	10,91	1,07	10,91
II	2,00	12,73	1,07	12,73
III	2,14	16,36	1,11	16,36

Estas relações mostraram que houve uma diferença muito grande entre os valores de RU e os valores de RN. Verificou-se que o aumento da vida de fadiga nas condições finais não é explicado pelas alterações dos valores de densidade de energia de distorção na condição inicial de carregamento.

4.6 Validação com valores de deformações

A fim de verificar que a condição de carregamento na simulação foi muito importante na obtenção dos resultados acima, comparou-se os valores das deformações medidas no início do ensaio (Capítulo 3) com os valores obtidos na simulação (Tabela 4.15 e 4.16). Verificou-se apenas para a segunda etapa, em que a geogrelha passa exatamente na extremidade da trinca, no caso flexão. Os valores foram obtidos em nível dos elementos.

Tabela 4.15 Valores das deformações no centro do elemento E_2 e deformações medidas no início do ensaio (pressão: $5,49 \text{ kgf/cm}^2$; geogrelha exatamente na extremidade da trinca).

Deformações				
Centro do elemento E_2				
Com geogrelha			Sem geogrelha	
Trinca (mm)	<i>Simulação</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Simulação</i>	<i>Ensaio</i>
3	0,163	0,200	0,432	0,400
6	0,147	0,150	0,360	0,400
9	0,146	0,150	0,353	0,300

As relações mostraram que os valores de deformações foram bastante semelhantes, entre os obtidos na simulação e os obtidos no início do ensaio. Justifica-se assim, que na condição inicial do ensaio os valores foram explicados pela simulação.

5. CONCLUSÕES

Das simulações efetuadas nesta pesquisa, as seguintes conclusões puderam ser extraídas:

- Na primeira etapa das simulações efetuadas (geogrelha a 20 mm da trinca), os valores de U foram semelhantes aos valores sem o uso do reforço, devido as condições iniciais da simulação;
- O efeito da inserção da geogrelha em U foi bem maior na segunda etapa das simulações, com a geogrelha localizada diretamente sobre a extremidade da pré-trinca. As vidas de fadiga experimentais também foram bem maiores neste caso. Logo, a eficácia da geogrelha aumenta à medida que ela é posicionada mais próximo à pré-trinca, sendo este um resultado associado à maior redistribuição de tensões;
- Na segunda etapa, o efeito em U foi maior com a trinca de abertura 3 mm, reduzindo-se com a trinca de 6 mm e tornando a aumentar com a trinca de 9 mm. Logo, apenas com trincas de abertura grande é que a geogrelha passa a

trabalhar como um elemento de redução de deformações excessivas. Com a trinca mais fechada, o efeito da geogrelha deve aumentar porque cresce a concentração de tensões na extremidade de trincas mais afiladas;

- Na terceira etapa, a simulação teve como finalidade empreender uma análise comparativa entre vigas com geogrelhas de diferentes módulos de elasticidade. O efeito de U foi menor que o observado experimentalmente, pois o efeito aparece ao longo do tempo e a análise ocorreu nas condições iniciais;
- Nas relações entre os valores de vida de fadiga experimental e da densidade de energia de distorção verificou-se que a presença da geogrelha não afetou de forma significativa o estado de tensões na extremidade da trinca, devido às condições de carregamento usado serem diferentes. Na simulação os valores foram obtidos na condição inicial de carregamento e no ensaio na condição final. Assim, a idéia inicial de se obter alguma mudança no estado de tensão já na condição inicial de carregamento não ocorreu. O seu efeito se dá à medida que a trinca se propaga, nas condições finais.
- Isto pode ser justificado nas relações entre os valores de deformações entre os obtidos na simulação e os obtidos no início do ensaio. Justificou-se assim, que na condição inicial do ensaio os valores foram explicados pela simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 12553: Geossintético – Terminologia.** São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003. 5p.

BENEVIDES, S.A.S. **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – Método Empírico do DNER e Resiliência da COPPE/UFRJ – em Rodovias do Ceará.** 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

BONDT, A.H. **Anti - Reflective Cracking Design of (Reinforced) Asphaltic Overlays.** 1999. Tese (Doutorado) - Technische Universiteit Delft, 1999.

BROWN, S.F. et al. Polymer Grid Reinforced of Asphalt. **Proc. Ass. Of Asphalt Pav. Tech.**, vol. 54, p. 18-41, 1985.

CARDOSO, S.H. Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., Cuiabá, 1995. **Anais...** Cuiabá, 1995. v. 2, p.377-401.

CERATTI, J.A.P. **Estudo de desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas em pavimentos flexíveis.** [S.L.: S.n.], 1998. Projeto Capes/CNPQ 098/98.

COLOMBIER, G. Fissuration des Chaussées: Nature et Origine des Fissures; Moyens pour Maîtriser leur Remontée. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT, Belgium, 1989. **Proceedings...** Belgium, 1989. p. 3-22.

DNER – PRO 10/79. **Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A.** Rio de Janeiro: DNER, 1979a.

DNER – PRO 11/79. **Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B.** Rio de Janeiro: DNER, 1979b.

DNER. **Guia de Gerência de Pavimentos.** Rio de Janeiro: DNER, 1983.

FREITAS, F.A.C. **Modelagem da Formação e Propagação de Trincas em Misturas Betuminosas através do Método dos Elementos Finitos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

GILCHRIST, A.J.T.; BROWN, S.F. Polymer Grid Reinforced Asphalt to Limit Cracking and Rutting in Pavements. In: IRF MIDDLE EAST REGIONAL MEETING, 3rd, Riyadh, Saudi Arabia, 1988. **Proceedings...** Riyadh, Saudi Arabia, 1988.

GONTIJO, P.R.A.; GUIMARÃES, F.H.R.; NOGUEIRA, C.L. Metodologias Brasileiras para Avaliações das Características Funcionais e Estruturais de Pavimentos Rodoviários – Estado da Arte. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., Belo Horizonte, 1994. **Anais...** Belo Horizonte, 1994. V. 1, p. 501- 529

HAAS, R.; HUDSON, W.R.; and ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Malabar: Krieger Publishing Company, 1994.

JAYAWICKRAMA, P.W. and LYTTON, R. Methodology for Predicting Asphalt Concrete Overlay Life Against Reflection Cracking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 6th, 1987. **Proceedings...** v.I, p. 912-924.

MEDINA, J., MACEDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G. Utilização de Ensaio Defletométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28^a. Belo Horizonte, 1994. **Anais...** Belo Horizonte, 1994. V. 1, p.595-625,

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

MOLENAAR, A.A.A. Evaluation of Pavement Structure with Emphasis on Reflective Cracking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT, 2nd, 1993. **Proceedings...** Ed. Rigo and R. Degeimbre, Rilem, Liege, 1993. p. 21-48.

MOMM, L. Fadiga dos Concretos Asfálticos, Estudo do Efeito da Granulometria. In: SEMINÁRIO NACIONAL MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS, Florianópolis, 2º, 2000. **Anais...** Florianópolis, 2000.

MONTESTRUQUE, G.E.V. **Contribuição para a elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas.** 2002. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, 2002.

MONTESTRUQUE, G.E.V. **Estudo de Sistemas Anti- Reflexão de Trincas na Restauração de Pavimentos.** 1996. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, 1996.

MOTTA, L.M.G. **Método de Dimensionamento de Pavimento Flexível; Parâmetro de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas.** 1991. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

NEBLAUER, S. Reinforcement of Flexible Pavements – Design of Finite Elements Models. In: BEARING CAPACITY OF ROADS, RAILWAYS AND AIRFIELDS, 6th, Lisboa, 2002. **Proceedings...** Lisboa, 2002. v.1, p. 223-230.

PARIS, P.C.; ERDOGAN, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Transactions of the American Society for Mechanical Engineers. **Journal of Basic Engineering, Séries D**, v.85, No.3, 1963.

PERNG, J.D. **Analysis of Crack Propagation in Asphalt Concrete Using A Cohesive Crack Model.** 1989. Tese (Doutorado) - Ohio State University, 1989.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.** 1991. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

PITTA, D.M.; BALBO, J.T. Estudo de Caso de Retroanálise de Superfícies Deformadas em Pavimentos Asfálticos da Região Sul do Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31^a, São Paulo, 1998. **Anais...** São Paulo, 1998. v. 2 p. 815-834.

RIGO, J.M., DEGEIMBRE, R.; FRANCKEN, L. (Editors) . INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENTS - State of the Art and Design Recommendations, 2nd, Liege, march 10-12, 1993. **Proceedings...** Liege, 1993.

RIVIERE, N. **Comportement em Fatigue dês Enrobés Bitumineux.** 1996. Tese (Doutorado) - Université de Bordeaux I, Bordeaux, 1996.

RODRIGUES, R.M. Aplicação da Mecânica dos Pavimentos ao Projeto e à Avaliação Estrutural dos Pavimentos Asfálticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29ª Cuiabá, 1995. **Anais...** Cuiabá, 1995. v. 2, p.322-345.

RODRIGUES, R.M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos.** 1991. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

RODRIGUES, R.M. **Gerência de Pavimentos.** São José dos Campos – SP: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2000b. (Apostila do Curso de Sistemas de Gerência da Infra-Estrutura Viária - Parte II).

RODRIGUES, R.M. (2003). Geossintéticos aplicados à Pavimentação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 4., e CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 5., Porto Alegre, 2003. **Anais...** Porto Alegre, 2003. p. 9-37.

RODRIGUES, R.M. Metodologia para Projeto de Restauração de Pavimentos por Meio de Sistemas Anti-Reflexão de Trincas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Salvador, 30ª, 24 a 29 de novembro, 1996. **Anais...** Salvador, 1996. p. 1535-1561.

RODRIGUES, R.M. **Projeto de Pavimentos.** São José dos Campos – SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000a. (Apostila do Curso de Projeto Estrutural de Pavimentos - Parte I).

Sanders, P. **Reinforced Asphalt..** Nottingham, England: University of Nottingham, Transport Research Laboratory, 2000.

Silva, P.D.E.A. **Contribuição para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis.** 1995. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

APÊNDICE I

Viga com a trinca: 3 mm e a geogrelha colocada na extremidade da trinca.

Pretende-se, neste anexo, apresentar a seqüência da utilização do programa MSC/NASTRAN na simulação das vigas.

Será apresentado um exemplo da viga de 3 mm de abertura com a geogrelha na extremidade.

Comandos do programa MSC/NASTRAN versão 4.0.

Trinca de 3 mm

1. Introduz um novo modelo:

Select New Model

Tools / Workplane (or F2) / Draw Workplane / Done
View / Regenerate (or Ctrl G).

2. Crie os materiais:

Select Model / Material

Title *mat_1*
Young's Modulus *40000*
Poisson's Ratio *0.33*
Select **OK**

Title *mat_2*
Young's Modulus *500*
Poisson's Ratio *0.30*
Select **OK**

Title *mat_3*
Young's Modulus 454540
Poisson's Ratio 0.30
Select **OK / Cancel.**

3. Crie as propriedades dos materiais:

Select Model / Property

Title *prop_1*
Material *mat_1*
Note that the default element type is Plate element, not parabolic.
Line Elements *Plate*
Thickness, Tavg or T₁ 7.5
Select **OK**

Title *prop_2*
Material *mat_2*
Line Elements *Plate*
Thickness, Tavg or T₁ 7.5
Select **OK**

Title *prop_3*
Material *mat_3*
Line Elements *Bar*
Shape
Rectangular bar
 $H = 0,2$
 $With = 1,6$
Select **OK / Cancel.**

4. Crie a geometria para a viga:

Mesh / Between

Property *prop_2*
Mesh size

	Dir 1	Dir2
#Nodes	191	21
Bias	1	0,2
X	Y	Z
0	0	0
19	0	0
19	2	0
0	2	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	21	21
Bias	1	0,2
X	Y	Z
19	0	0
21	0	0
21	2	0
19	2	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	15	21
Bias	0,2	0,2
X	Y	Z
21	0	0
22,4	0	0
22,4	2	0
21	2	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	7	21
Bias	4	0,2
X	Y	Z
22,4	0	0
23	0	0

23	2	0
22,4	2	0

Property *prop_1*

Mesh size

	Dir 1	Dir2
#Nodes	191	41
Bias	1	0,2
X	Y	Z
0	2	0
19	2	0
19	6	0
0	6	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	21	41
Bias	1	0,2
X	Y	Z
19	2	0
21	2	0
21	6	0
19	6	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	15	41
Bias	0,2	0,2
X	Y	Z
21	2	0
22,4	2	0
22,4	6	0
21	6	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	191	36
Bias	1	0,2
X	Y	Z
0	6	0
19	6	0
19	9,5	0
0	9,5	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	21	36
Bias	1	0,2
X	Y	Z
19	6	0
21	6	0
21	9,5	0
19	9,5	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	15	36
Bias	0,2	0,2
X	Y	Z
21	6	0
22,4	6	0
22,4	9,5	0
21	9,5	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	6	36
Bias	0,2	0,2
X	Y	Z
22,4	6	0
22,85	6	0

22,85	9,5	0
22,4	9,5	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	191	76
Bias	1	4
X	Y	Z
0	9,5	0
19	9,5	0
19	17	0
0	17	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	21	76
Bias	1	4
X	Y	Z
19	9,5	0
21	9,5	0
21	17	0
19	17	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	15	76
Bias	0,2	4
X	Y	Z
21	9,5	0
22,4	9,5	0
22,4	17	0
21	17	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	6	76
Bias	0,2	4

X	Y	Z
22,4	9,5	0
22,85	9,5	0
22,85	17	0
22,4	17	0

	Dir 1	Dir2
#Nodes	3	76
Bias	4	4
X	Y	Z
22,85	9,5	0
23	9,5	0
23	17	0
22,85	17	0

Para a geogrelha:

Mesh / Between

Property *prop_3*

Mesh size

Dir 1

#Nodes *191*

Bias *1*

X	Y	Z
---	---	---

0	9,5	0
---	-----	---

19	9,5	0
----	-----	---

Dir 1

#Nodes *21*

Bias *1*

X	Y	Z
---	---	---

19	9,5	0
----	-----	---

21	9,5	0
----	-----	---

```

Dir 1
#Nodes      15
Bias        4
X          Y          Z
21         9,5        0
22,4       9,5        0

```

```

Dir 1
#Nodes      6
Bias        4
X          Y          Z
22,4       9,5        0
22,85      9,5        0

```

```

Dir 1
#Nodes      3
Bias        0,2
X          Y          Z
22,85      9,5        0
23         9,5        0

```

5. Remova os nós coincidentes do modelo.

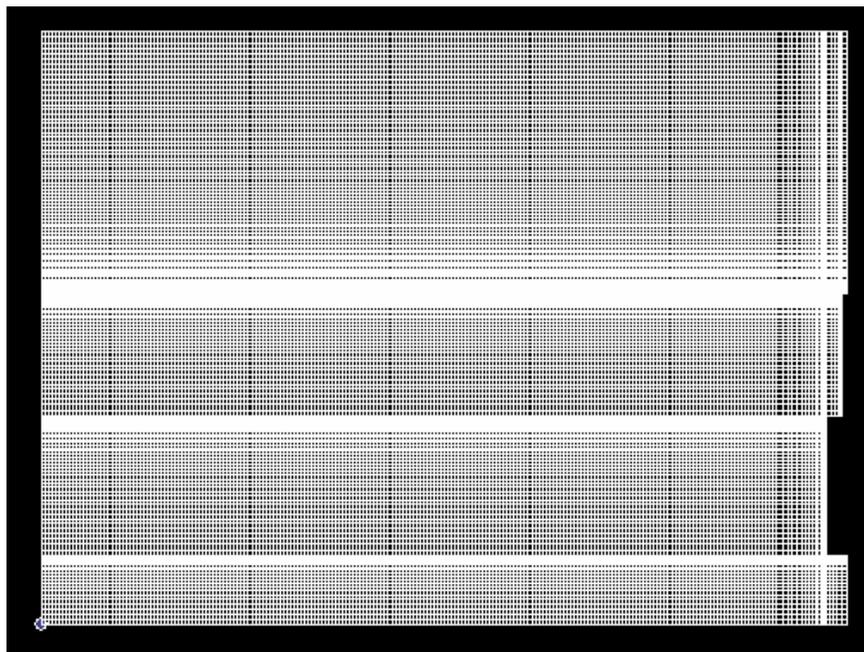
Additional nodes were created while generating QUAD4 elements. To eliminate these coincident nodes, do the following:

Tools / Check / Coincident Nodes / Select All / OK

When asked if you wish to specify an additional range of nodes to merge, respond No.

Options Merge Coincident Entities

Select **OK**.



To better view the display, do the following to remove the unnecessary labels:

View / Options / Quick Options (or Ctrl Q)

Point / Curve / Surface / Node / Labels Off / Done / **OK.**

6. Crie as condições de carregamento.

Like the constraints, a load set must first be created before creating the appropriate model loading.

Model / Load / Set (or Ctrl F2)

Title *load_1*

Select **OK.**

Since the type of load (pressure) is not an available option for the edge of the plate,

it must first be converted into nodal forces or distributed along the edge length and, then, applied to the model.

In this model, a (5,49, 4,245 e 3,265 kgf/cm²) pressure force acting over the 30,0 cm² (4 in 7,5 cm) can be converted to a total equivalent nodal force of (164,70, 127,35 e 97,95 kgf). Since we are going to distribute this force over 4 cm of edge length, the force per length will be (41,175, 31,8375 e 24,4875 kgf/cm) and nodal force of (4,12, 3,20 e 2,44 kgf) acting over 0,10 cm of length.

Model / Load / On Curve

Select the above edge / **OK**.

Highlight *Force Per Length*

Load FX $\sqrt{-41.175}$ (carga 1)

Select **OK / Cancel**.

To visualize nodal forces:

Model / Load / Expand / OK

View / Options (or F6)

Category $\sqrt{\quad}$ *Labels, Entities and Color*

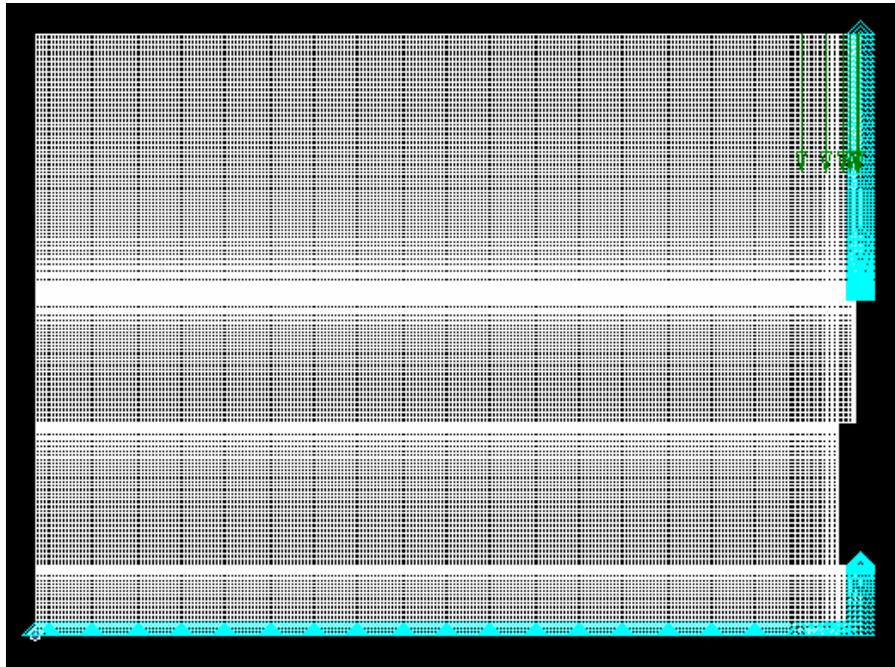
Options *Load – Force*

Label Mode *Load Value*

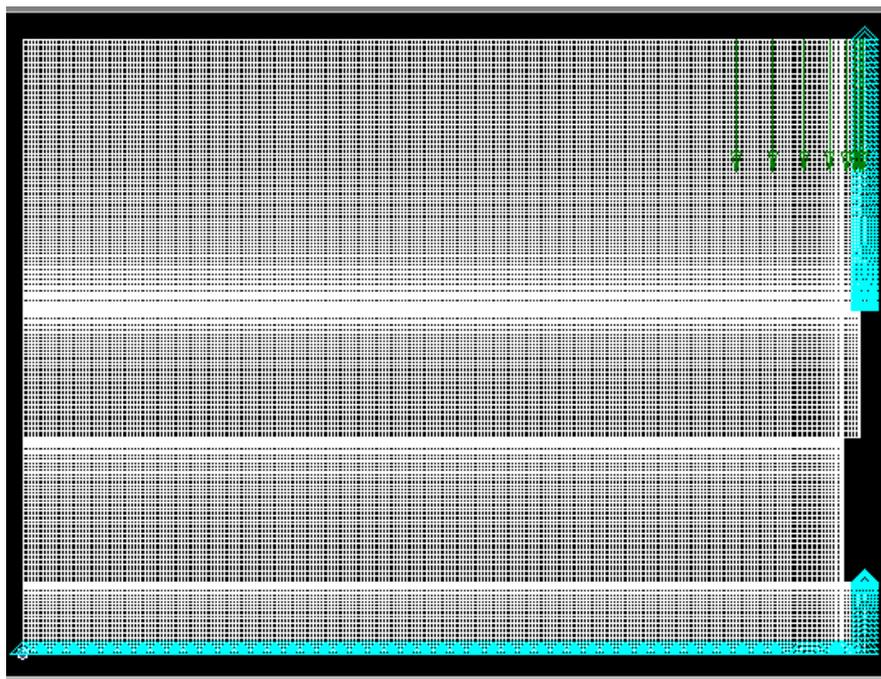
Select **OK**.

View / Regenerate (or Ctrl G).

Note that the nodes at the corners are loaded half as much as the inner nodes because they are surrounded by half as much area.



Flexão (a)



Cisalhante (b)

7. Crie os apoios do modelo.

Before creating the appropriate constraints, a constraint set needs to be created.

Do so by performing the following:

Model / Constraint / Set

Title *Constraint_1*

Select **OK**.

Now, define the relevant constraint for the model.

Para o caso FLEXÃO

Model / Constraint / Nodal / Method^/ on Curve

Select the right edge / OK.

On the DOF box, select X Symmetry / OK.

Finally, define the second relevant constraint for the model.

Select the nodes on the bottom corner / OK.

On the DOF box:

 *Fixed*
Select **OK**.

A warning message will appear: *Selected Constraints Already Exist. OK to Overwrite (No = Combine) ?* Select No to combine and, then, Cancel.

(Executar a análise – item 8).

Para o caso CISALHANTE

Model / Constraint / Nodal / Method^/ on Curve (**output 1**)

Select the right edge / OK.

On the DOF box, select X Symmetry / OK.

Finally, define the second relevant constraint for the model.

Select the nodes on the bottom corner / OK.

On the DOF box:

 *Fixed*
Select **OK**.

A warning message will appear: *Selected Constraints Already Exist. OK to Overwrite (No = Combine) ?* Select No to combine and, then, Cancel.

(Executar a análise – item 8 salvando o resultado como o output 1 e depois voltar para o passo abaixo, output 2).

Model / Constraint / Nodal / Method^/ on Curve (**output 2**)

Select the right edge / OK.

On the DOF box, select X Axi-Symmetry / OK.

(Executar a análise – item 8 salvando o resultado como o output 2).

Somar os dois resultados (combinação)

Model / Output / Linear

Select From

Output Set

Output 1

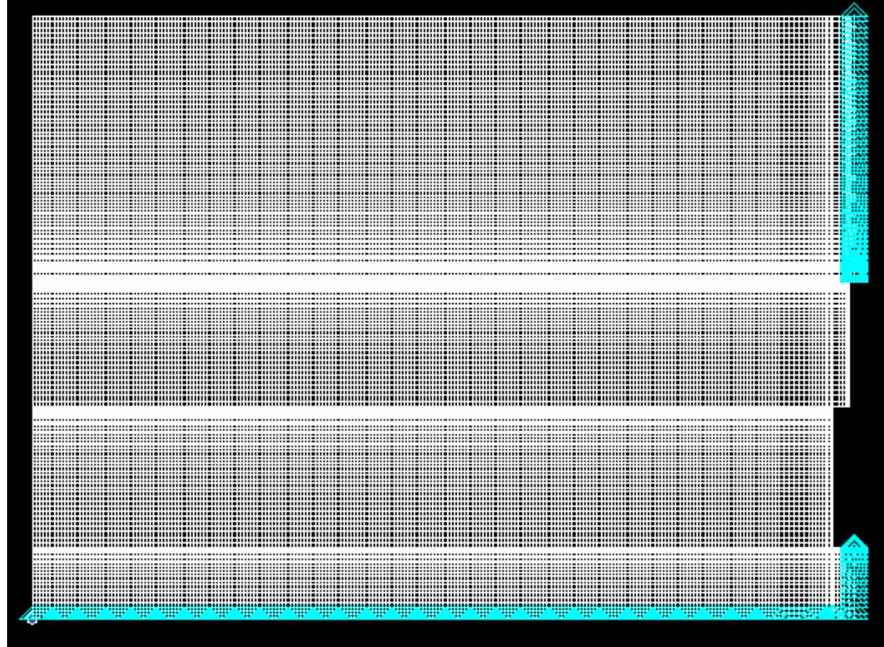
More

Select From

Output Set

Output 2

Last on



8. Execute a análise.

File / Analyze

Analysis Type	<i>Static</i>
Loads	<input type="checkbox"/> <i>load_1</i>
Constraints	<input type="checkbox"/> <i>constraint_1</i>
	<input type="checkbox"/> <i>Run Analysis</i>

Select **OK**.

When asked if you wish to save the model, respond Yes.

Be sure to set the desirable working directory.

File Name	<i>base3f1_gg</i>	(flexão – carga1)
	<i>base3c1_gg</i>	(cisalhante – carga1)

Select **Save**.

When the MSC/ NASTRAN manager is through running, MSC/ NASTRAN for Windows will be restored on your screen, and the Message Review form will appear. To read

the messages, you could select Show Details. Since the analysis ran successfully, we will not bother with the details this time. Then, select Continue.

9. Veja os resultados da análise.

First, however, you may want to remove the load and boundary constraint markers.

View / Options / Quick Options (or Ctrl Q)

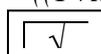
Force/ Constraint / Done / **OK.**

Como o software não gera os resultados da densidade de energia de distorção foi inserida uma fórmula no programa (descrita no Capítulo 4) em função da tensão de von Mises (valor gerado pelo software).

Model / Output/ Calculate/ Select All

Title *Densidade de energia de distorção*

Equation $((1+MAT(1;6))/(3*MAT(1;0))) * SQR(VEC(!case;7033;!))$



Elemental Data

Select All

OK.

View the Densidade de energia de distorção:

View / Select (or F5)

Deformed Style *None – Model Only*

Contour Style *Contour*

Deformed and Contour Data

Output Vectors / Contour 300000 Densidade de energia de distorção

Select **OK / OK.**

From the Stress Scale, confirm the maximum Densidade de energia de distorção value clicking Off, at the right bottom side of the screen, and then selecting Node (para a análise nodal) and Element (para a análise no elemento).

File / Save

File / Exit.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TM	2. DATA 28 de julho de 2005	3. DOCUMENTO Nº CTA/ITA-IEI/TM-007/2005	4. Nº DE PÁGINAS 116
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Interpretação numérica de ensaios de fadiga em concreto asfáltico reforçado com geogrelha.			
6. AUTOR(ES): Michela Steluti Poletti			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Restauração de pavimentos, elementos finitos, métodos numéricos, trincamento			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Pavimentos; Ensaios de fadiga; Análise numérica; Método de elementos finitos; Propagação de trincas; Engenharia civil			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos, 2005, 116 páginas.			
11. RESUMO: Esta pesquisa trata da análise numérica pelo método dos elementos finitos de ensaios de fadiga de laboratório realizados em vigas de concreto asfáltico, contando ou não com a presença de camadas intermediárias especiais do tipo geogrelha polimérica, atuando como camadas intermediárias em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas. Verificou-se que a presença da geogrelha, não afeta de forma significativa o estado de tensões na extremidade da trinca subjacente à camada asfáltica. O seu efeito se dá à medida que a trinca se propaga, nas condições finais. A condição de carregamento usada na análise foi diferente da realizada no ensaio. Na simulação os valores foram obtidos na condição inicial de carregamento e no ensaio na condição final. A idéia inicial era verificar se já na condição inicial de carregamento ocorreria alguma mudança no estado de tensão. Assim, as comparações realizadas não mostram alterações no estado de tensão na extremidade da trinca subjacente à camada asfáltica.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			