

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RECAPEAMENTOS ASFÁLTICOS
COM CAMADA INTERMEDIÁRIA DE GEOTÊXTIL SUBMETIDOS À
SOLICITAÇÃO POR SIMULADOR DE TRÁFEGO**

Marcelo Menezes Fiorin

Porto Alegre

Agosto 2009

MARCELO MENEZES FIORIN

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RECAPEAMENTOS ASFÁLTICOS
COM CAMADA INTERMEDIÁRIA DE GEOTÊXTIL SUBMETIDOS À
SOLICITAÇÃO POR SIMULADOR DE TRÁFEGO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre

Agosto 2009

F521a

Fiorin, Marcelo Menezes

Avaliação de desempenho de recapeamentos asfálticos com camada intermediária de geotêxtil submetidos à solitação por simulador de tráfego / Marcelo Menezes Fiorin. – 2009.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientação: Prof. Dr. Washington Peres Núñez

1. Pavimentação. 2. Geotêxteis. 3. Recapeamento asfáltico. 4. Ensaio acelerado. I. Núñez, Washington Peres, orient. II. Título.

CDU-628.5(043)

MARCELO MENEZES FIORIN

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RECAPEAMENTOS ASFÁLTICOS
COM CAMADA INTERMEDIÁRIA DE GEOTÊXTIL SUBMETIDOS À
SOLICITAÇÃO POR SIMULADOR DE TRÁFEGO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de Agosto de 2009

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. em Engenharia pela UFRGS
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
D.Sc. pela COPPE/UFRJ

Prof. Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)
Dra. pela Universidade de São Paulo

Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUÍ)
Dr. em Engenharia pela UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Vera, minha irmã Luciana por terem me dado o apoio necessário em muitos momentos durante a realização desse trabalho.

Ao professor Washington Peres Núñez e Suyen Nakahara pela orientação e pelo tempo disponibilizado.

Agradeço muito a toda a equipe da Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos da UFRGS, que sempre estiveram disponíveis e prontos para ajudar na realização dos ensaios.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que, através de professores e funcionários, tornaram possível a realização dessa pesquisa.

RESUMO

FIORIN, M. M. **Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos com Camada Intermediária de Geotêxtil Submetidos à Solicitação por Simulador de Tráfego.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Esta dissertação apresenta os resultados e análises do monitoramento de um recapeamento asfáltico executado com camada intermediária de geotêxtil. A pista experimental vem sendo solicitada desde 1999, em uma pesquisa que se encontra na sua terceira fase, atingindo 1.103.885 ciclos de carga de 100 kN aplicados. Nessa última fase de estudo o tráfego foi aplicado entre Setembro de 2008 e Fevereiro de 2009, totalizando 121.685 ciclos de carga de eixo de 100 kN. A pista foi dividida em três regiões, sendo empregado em duas delas geotêxteis impregnados com asfalto. Durante o período de estudo foram monitorados parâmetros de resposta estrutural, através de medidas de deflexões e bacias defletométricas, parâmetros de comportamento, através de medidas de deformações permanentes e mapeamento de trincas, e por fim parâmetros ambientais, através das medidas de temperatura do ar e precipitações. Foram também aplicados modelos de previsão de desempenho para o caso de reflexões de trincas. O monitoramento do trincamento na pista mostrou que as regiões com geotêxtil tiveram melhor desempenho quando comparadas à região sem camada intermediária. O comprimento de trincas no final do estudo foi de 764 cm na região sem camada intermediária, 328 cm na região com geotêxtil G150 e 554 cm na região com geotêxtil G150 TF. Foram extraídos corpos de prova da pista, sobre algumas trincas, de modo a se visualizar o modo de desenvolvimento do trincamento, e também para buscar se identificar onde ocorreu trincamento por reflexão. Não foi possível extrair CPs de todas as trincas face a proximidade das mesmas e das dimensões da sonda rotativa, porém do material retirado observou-se ocorrência de trincamento por reflexão, trincamento por fadiga e também trincamento conhecido como *top-down cracking* (TDC). Os resultados evidenciam que a inclusão de geotêxteis como camada de absorção de tensões aumenta significativamente a vida de recapeamentos asfálticos executados sobre pavimentos trincados.

Palavras-chave: reflexão de trincas, recapeamentos asfálticos, geotêxteis, ensaios acelerados, simulador de tráfego, modelos de previsão de desempenho.

ABSTRACT

FIORIN, M. M. **Performance Evaluation of Asphalt Overlays Containing Intermediate Layer of Geotextile Submitted to Traffic Simulator**. 2009. MSc Dissertation (Civil Engineering) – Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

This dissertation presents the results of the monitoring and analysis of an overlay executed with intermediate geotextile layer. The experimental track has been requested since 1999, in a research that is in its third phase, reaching 1.103.885 cycles of 100 kN axle load applied. In this last phase of the study, the traffic was applied between September 2008 and February 2009, totaling 121.685 cycles of 100 kN axle load. The track is divided into three regions, two of them uses geotextiles impregnated with asphalt. During the study period were monitored parameters of structural response, by means of deflections and basins, parameters of behavior, by means of permanent deformation and mapping of cracks, and finally environmental parameters, through the measures of air temperature and rainfall. Models were also applied to predict the performance of the overlay. The monitoring of cracking showed that regions with geotextile had improved performance when compared to the region without intermediate layer. The length of cracks at the end of the study was 764 cm in the region without intermediate layer, 328 cm in the region with geotextile G150 and 554 cm in the region with geotextile G150 TF. Samples were extracted from the track to see how the cracking was developed and also to identify where there was reflective cracking. On the material removed was observed occurrence of reflective cracking, fatigue cracking and also top-down cracking (TDC). The results show that geotextiles increases the life of concrete asphaltic overlays.

Key-words: reflective cracking, overlays, geotextile, APT, traffic simulator, prediction models.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	14
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 INTRODUÇÃO	17
2.2 DEFEITOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	17
2.3 REFLEXÃO DE TRINCAS	26
2.3.1 Origens	26
2.3.2 Mecanismos de Controle	27
2.4 UTILIZAÇÃO DE GEOTÊXTEIS	28
2.5 ENSAIOS ACELERADOS	33
2.6 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO	38
3. CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL	50
3.1 INTRODUÇÃO	50
3.2 ESTRUTURA DA PISTA	50
3.2.1 Camada Final de Terraplenagem	52
3.2.2 Sub-base de Macadame Seco	52
3.2.3 Base de Brita Graduada	52
3.2.4 Tratamento Superficial Duplo (TSD)	53
3.2.5 Camadas de Concreto Asfáltico	53
3.2.6 Características dos Geotêxteis	55
3.3 EXECUÇÃO DA PISTA	56

4. SIMULADOR DE TRÁFEGO UFRGS/DAER	58
4.1 CALIBRAÇÃO DA UNIDADE HIDRÁULICA	61
5. METODOLOGIA	65
5.1 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL	66
5.2 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO	66
5.2.1 Evolução do Trincamento	66
5.2.2 Deformações Permanentes	67
5.3 PARÂMETROS AMBIENTAIS	67
5.4 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO	67
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
6.1 HISTÓRICO DE CARREGAMENTO	68
6.2 PARÂMETROS AMBIENTAIS	68
6.3 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO	70
6.3.1 Evolução do Trincamento	70
6.3.2 Modelagem dos Dados Experimentais	73
6.3.3 Análise do Trincamento	76
6.3.4 Deformações Permanentes	79
6.4 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL	83
6.4.1 Deflexões	83
6.5 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO	88
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS	95
7.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA	95
7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação Esquemática dos Defeitos (DNIT, 2003)	19
Figura 2.2: Modos de Fratura (Medina e Motta, 2005)	21
Figura 2.3: Representação do Afundamento e do Solevamento	25
Figura 2.4: Probabilidade de Reflexão de Trincas (DEF = 0,5 mm)	44
Figura 2.5: Probabilidade de Reflexão de Trincas (DEF = 1,0 mm)	44
Figura 3.1: Padrão de Trincamento (Viera, 2002)	51
Figura 3.2: Seções da Pista Experimental (Viera, 2002)	51
Figura 4.1: Simulador de tráfego UFRGS/DAER	58
Figura 4.2: Unidade de leitura digital	61
Figura 4.3: Célula de carga	62
Figura 4.4: Posicionamento das placas metálicas e da célula de carga	62
Figura 4.5: Curva de calibração da unidade hidráulica	63
Figura 4.6: Curva de calibração da unidade hidráulica	64
Figura 6.1: Precipitações pluviométricas acumuladas	69
Figura 6.2: Variação das temperaturas do ar	70
Figura 6.3: Evolução do Trincamento	71
Figura 6.4: Densidade do Trincamento entre 0 e 515,493 ciclos de carga	71
Figura 6.5: Densidade do Trincamento entre 982,200 e 1.103,885 ciclos de carga	72
Figura 6.6: Evolução do trincamento N = 982,200	72
Figura 6.7: Evolução do trincamento N = 1.013,940	72
Figura 6.8: Evolução do trincamento N = 1.045,920	73
Figura 6.9: Evolução do trincamento N = 1.078,020	73
Figura 6.10: Evolução do trincamento N = 1.103,885	73
Figura 6.11: Curva de ajuste da evolução do trincamento (G150)	74
Figura 6.12: Curva de ajuste da evolução do trincamento (G150 TF)	75
Figura 6.13: Curva de ajuste da evolução do trincamento (Região sem Geotêxtil)	75
Figura 6.14: Localização dos corpos de prova extraídos	76
Figura 6.15: Trincamento por reflexão na pista experimental	77
Figura 6.16 – Trincamento do tipo <i>top down cracking</i>	78
Figura 6.17 – Desvio de trinca característico do emprego de geotêxteis	78

Figura 6.18 - Trincamento iniciando na base do recapeamento	79
Figura 6.19 – Evolução das deformações permanentes médias nas três regiões da pista	80
Figura 6.20 – Deformações permanentes máximas e médias	81
Figura 6.21 – Evolução da velocidade de deformação plástica – G150	81
Figura 6.22 – Evolução da velocidade de deformação plástica – S/Geotêxtil	82
Figura 6.23 – Evolução da velocidade de deformação plástica – G150 TF	82
Figura 6.24 – Deflexões médias sob carga de eixo de 100 kN	83
Figura 6.25 – Deflexões características corrigidas – Região com geotêxtil G150	84
Figura 6.26 – Deflexões características corrigidas – Região sem geotêxtil	85
Figura 6.27 – Deflexões características corrigidas – Região com geotêxtil G150 TF	85
Figura 6.28 – Variação das bacias de deflexões – Região com geotêxtil G150	86
Figura 6.29 – Variação das bacias de deflexões – Região sem geotêxtil	86
Figura 6.30 – Variação das bacias de deflexões – Região com geotêxtil G150 TF	87
Figura 6.31 – Tempo para início do trincamento segundo modelo de Coelho e Queiroz	90
Figura 6.32 – Tempo para início do trincamento por reflexão segundo modelo do HDM III	91
Figura 6.33 – Porcentagem de trincas refletidas por ano – Região sem geotêxtil	93
Figura 6.34 – Porcentagem de trincas refletidas por ano – Região com geotêxtil	93
Figura 6.35 – Trincamento observado e trincamento imposto	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Deformações permanentes, causas e associação com o carregamento de tráfego (DNIT, 2006)	26
Tabela 2.2: Intensidade do Trincamento (CI) - (adaptado de Rolt <i>et al.</i> (1997))	43
Tabela 2.3: Valor das Constantes "a", "b" e "c" em Função de CI	43
Tabela 2.4: Parâmetros do Modelo - (NCHRP, 2004)	49
Tabela 3.1: Estrutura do Pavimento	50
Tabela 3.2: Resumo das Propriedades do Solo	52
Tabela 3.3: Análise Granulométrica (Núñez, 1997)	53
Tabela 3.4: Propriedades das Britas (Núñez, 1997)	53
Tabela 3.5: Distribuição Granulométrica dos Materiais Pétreos do CBUQ (Viera, 2002)	54
Tabela 3.6: Densidade dos Materiais Pétreos (Viera, 2001)	54
Tabela 3.7: Características Marshall do traço especificado (Viera, 2002)	54
Tabela 3.8: Características Marshall <i>in situ</i> (Viera, 2002)	55
Tabela 3.9: Módulo de Resiliência de Corpos de Prova <i>in situ</i> (Viera, 2002)	55
Tabela 3.10: Propriedades dos Geotêxteis (Viera, 2002)	56
Tabela 4.1: Tempo de Operação para Aplicação de 10 ⁶ Cargas de Eixo Padrão	60
Tabela 4.2: Relações entre carga de semi-eixo e pressão na unidade hidráulica	63
Tabela 4.3: Relações entre carga de semi-eixo e pressão na unidade hidráulica	64
Tabela 6.1: Ciclos de Carga nos Períodos de Estudo	68
Tabela 6.2: Constantes de Ajuste do Modelo	74
Tabela 6.3: Raios de curvatura - Região com geotêxtil G150	87
Tabela 6.4: Raios de curvatura - Região sem geotêxtil	88
Tabela 6.5: Raios de curvatura - Região com geotêxtil G150 TF	88
Tabela 6.6: Parâmetros do Modelo - (NCHRP, 2004)	90
Tabela 6.7: Tempo de início do trincamento em anos	91
Tabela 6.8: Modelo NCHRP (2004) – Região sem geotêxtil	94
Tabela 6.9: Modelo NCHRP (2004) – Região com geotêxtil	94

LISTA DE SIGLAS

- AASHO:** *American Association of State Highway Officials*
- AASHTO:** *American Association of State Highway and Transportation Officials*
- ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- APT:** *Accelerated Pavement Testing*
- ASTM:** *American Society of Testing and Materials*
- ATR:** Afundamento nas Trilhas de Roda
- BG:** Brita Graduada
- CA:** Concreto Asfáltico
- CAP:** Cimento Asfáltico de Petróleo
- CBUQ:** Concreto Betuminoso Usinado à Quente
- CCM:** *cohesive crack model*
- CDM:** *continuum damage mechanics*
- CP:** Corpos de Prova
- CPTEC:** Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- DCSE:** *dissipated creep strain energy*
- DAER/RS:** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
- DNER:** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT:** Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre
- ESALs:** *Equivalent Single Axle Loads*
- FDOT:** *Florida Department of Transportation*
- FHWA:** *Federal Highway Administration*
- FWD:** *Falling Weight Deflectometer*
- HVS:** *Heavy Vehicle Simulator*
- INPE:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPH:** Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS
- IPR:** Instituto de Pesquisas Rodoviárias
- IPT:** Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- LAPAV:** Laboratório de Pavimentação
- LCPC:** *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
- LTPP:** *Long Term Pavement Performance*
- LVDT:** *Linear Variable Differential Transducer*
- MR:** Módulo de Resiliência

N: Número de Ciclos de Carga

NBR: Norma Brasileira Registrada

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*

PPGEC: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

RBV: Relação Betume Vazios

RT: Resistência à Tração

SAMI: *Stress Absorbing Membrane Interlayer*

SHRP: *Strategic Highway Research Program*

TDC: *top-down cracking*

TSD: Tratamento Superficial Duplo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE: *United States Army Corps of Engineers*

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VV: Volume de Vazios

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVAS

Problemas em pavimentos são uma constante em rodovias rurais e urbanas no Brasil, sendo diretamente responsáveis por dificuldades no tráfego de veículos e acidentes. Com o passar do tempo, o pavimento acaba por se deteriorar tanto na sua superfície quanto na sua estrutura, e um dos sinais característicos que se observa é o trincamento.

As trincas em um pavimento além de demonstrarem o seu estado de degradação, acabam ainda por diminuir a sua qualidade funcional e aumentar os cuidados e os custos na sua manutenção.

Dentre os fatores que originam as trincas podemos citar as variações de temperatura, ações de cargas de tráfego e condições pluviométricas. As origens do trincamento estão ligadas, de maneira geral, com a fadiga do revestimento asfáltico.

Uma das alternativas para resolução dos problemas de trincamento nos pavimentos é fazer a aplicação de uma nova camada asfáltica sobre a camada de pavimento trincada (recapeamento), esse método por vezes não se mostra muito eficiente, pois as trincas acabam se propagando da camada antiga para a nova camada com o passar do tempo.

Para reduzir a severidade e velocidade de propagação das trincas existem diversos métodos, como o emprego de geossintéticos, execução de camadas de alívio de tensões (SAMI), aumento na espessura de recapeamento, utilização de misturas asfálticas com ligantes modificados, dentre outros. O presente trabalho abordará o uso de geotêxteis como forma de controle na reflexão de trincas em pavimentos.

Geotêxteis são materiais têxteis sintéticos, compostos de fibras cortadas ou filamentos contínuos, que possuem propriedades hidráulicas e mecânicas tais, que fazem seu emprego de grande utilidade em diversas obras geotécnicas.

A utilização de geotêxteis como elemento anti-reflexão de trincas, consiste na sua aplicação na interface entre a camada antiga do pavimento e a nova camada a ser executada. O geotêxtil além de atuar no controle da reflexão das trincas também auxilia na redução da infiltração de água.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo geral

A pesquisa tem por objetivo geral analisar o desempenho dos geotêxteis quando empregados no controle da reflexão de trincas em pavimentos asfálticos, comparando resultados obtidos, relativos à evolução da degradação, em trechos experimentais recapeados, tendo faixas com e sem geotêxteis na camada intermediária entre o pavimento deteriorado e a nova camada.

1.2.2 Objetivos específicos

Para realização do estudo do trecho experimental, previamente executado no Campus do Vale da UFRGS, se fará o emprego do equipamento Simulador de Tráfego. Serão analisados dados referentes à condição estrutural e funcional do pavimento, no caso, deflexões e deformações permanentes, bem como acompanhamento das condições ambientais no período de estudo através de dados referentes a temperaturas e precipitações.

A pesquisa também buscará relacionar os modelos de previsão de desempenho existentes para reflexão de trincas, analisando e aplicando os que forem pertinentes as condições do pavimento ensaiado.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada do seguinte modo:

- No capítulo 2 apresenta-se a Revisão Bibliográfica, onde são descritos os estudos já realizados com o uso de Simuladores de Tráfego, estudos relativos ao emprego de

geotêxteis em sistemas anti-reflexão de trincas, bem como modelos de previsão de desempenho específicos para o caso de reflexão de trincas.

- No capítulo 3 descrevem-se detalhes relativos à construção e estrutura da pista experimental.
- No capítulo 4 apresenta-se uma descrição sobre o Simulador de Tráfego.
- No capítulo 5 descreve-se a metodologia empregada na presente pesquisa.
- No capítulo 6 apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos através do monitoramento realizado na pista experimental durante o período de solicitação da mesma pelo Simulador de Tráfego.
- No capítulo 7 apresentam-se as conclusões do estudo, bem como sugestões para futuras pesquisas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

A Norma Brasileira ABNT (1982) define o pavimento como

"O pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a":

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- Melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície do rolamento."

São consideradas duas categorias de pavimentos, a saber, pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, no caso específico de haver sob o revestimento betuminoso uma base cimentada, classifica-se o pavimento como semi-rígido (Medina e Motta, 2005).

Segundo Medina e Motta (2005), pavimento flexível é aquele "constituído por um revestimento betuminoso sob uma base granular ou de solo modificado granulometricamente". Pavimentos flexíveis, segundo Huang (1993), se caracterizam por serem constituídos de betume e materiais granulares, dispostos em camadas, onde a qualidade do material empregado vai decrescendo conforme o nível de tensão presente, ou seja, os materiais de melhor qualidade se localizam nas camadas superiores, pois as tensões são maiores.

2.2 DEFEITOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Com o passar do tempo, pavimentos asfálticos (flexíveis) começam a apresentar sinais de degradação tais como trincas, afundamentos, fissuras, dentre outros sinais que, por sua vez, são indicativos da proximidade do seu limite de vida útil.

A norma DNIT (2003) define os termos empregados para os defeitos e os divide em oito grandes grupos como fendas, afundamentos, ondulações, escorregamentos, exsudações, desgastes, panelas e buracos.

- Fendas: descontinuidades na superfície do pavimento que se dividem em fissuras e trincas. As fissuras são aberturas perceptíveis a uma distância inferior a 1,50m com vista desarmada, elas podem estar posicionadas transversalmente, longitudinalmente ou de forma oblíqua ao eixo da rodovia. Trincas, por sua vez, apresentam dimensões maiores que as fissuras e podem ser observadas mais facilmente, se dão por duas formas, isoladas (transversal, longitudinal e de retração) ou interligadas ("couro de jacaré" e "bloco");
- Afundamento: depressão na superfície do pavimento que pode ser afundamento plástico ou afundamento de consolidação;
- Ondulação ou Corrugação: como o nome diz, se caracteriza pelo aparecimento de ondulações ou corrugações transversalmente na pista de rolamento;
- Escorregamento: escoamento do revestimento, com a conseqüente formação de fendas, ocorrendo em períodos cuja temperatura está muito elevada;
- Exsudação: excesso de ligante no revestimento, isso resulta em superfície mais lisa e, portanto, mais escorregadia;
- Desgaste: arrancamento progressivo do agregado do pavimento;
- Panela ou Buraco: ocorre a ruptura do revestimento, podendo, dependendo do caso, ocorrer desagregação das camadas inferiores;
- Remendo: os remendos são o resultados do procedimento utilizado para fechar as panelas, podem ser superficiais ou profundos, isso vai depender do estado em que se encontrar o pavimento no momento do reparo.

Na Figura 2.1 observa-se representação esquemática dos defeitos segundo a norma DNIT (2003).

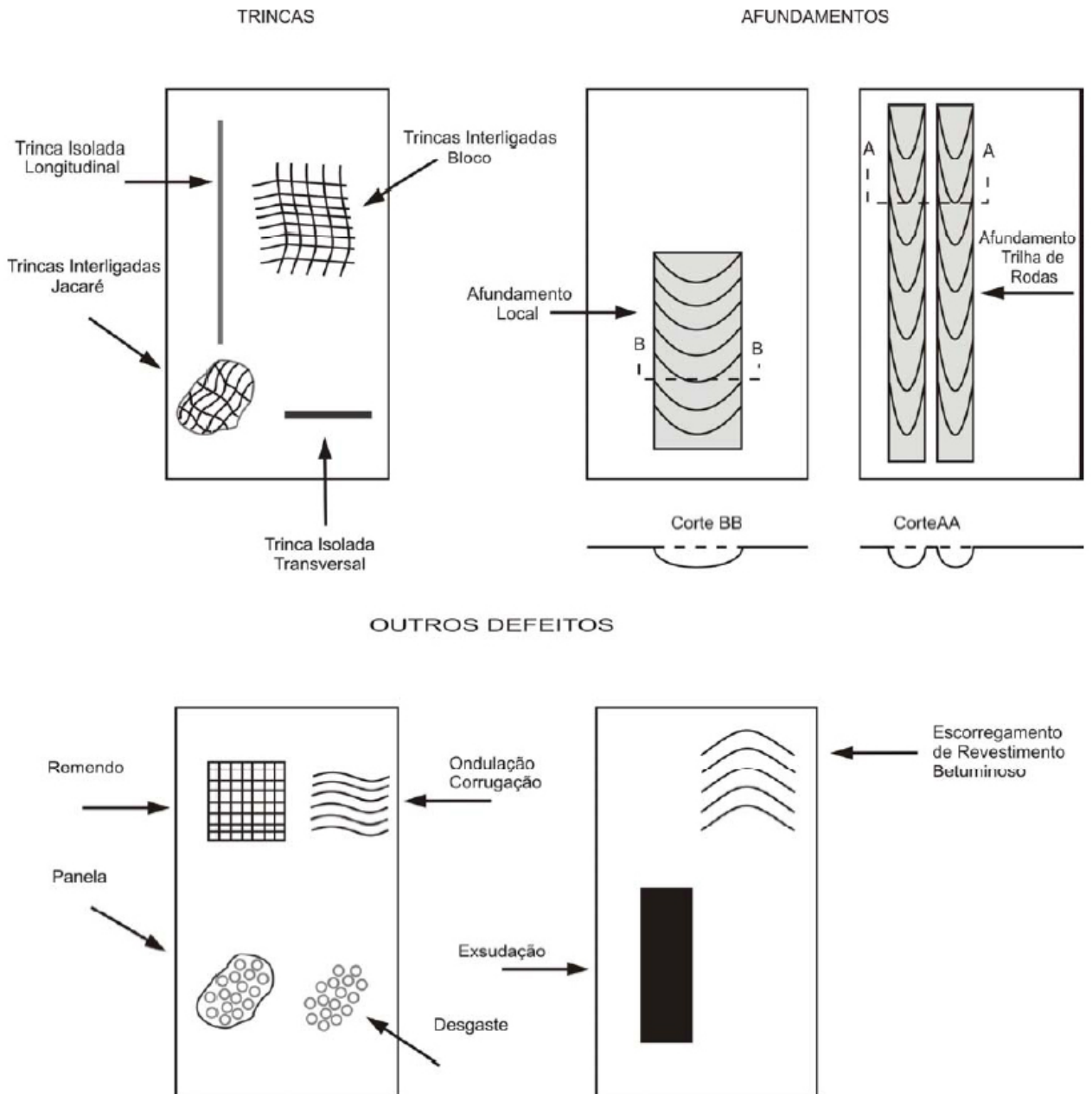


Figura 2.1 - Representação Esquemática dos Defeitos (DNIT, 2003)

A norma DNIT (2003) faz uma separação do trincamento em dois tipos, os trincamentos gerados pelas deformações permanentes excessivas e/ou relacionados ao fenômeno de fadiga e os trincamentos não relacionados com o fenômeno de fadiga.

Pela definição da norma temos:

- Trincamentos gerados por deformações permanentes excessivas e/ou fadiga: nesse caso específico temos três tipos de trincamentos, os trincamentos transversais, os trincamentos longitudinais e os trincamento do tipo "couro de jacaré". Abaixo segue definição empregada pela norma DNIT (2003).
 - Trinca Transversal: esse tipo de trincamento se caracteriza por trincas isoladas com direção ortogonal ao eixo da rodovia. Podem ser dos tipos curta e longa quando apresentarem extensão de até 100 cm e superiores a 100 cm, respectivamente.
 - Trinca Longitudinal: caracterizada por trincas isoladas com direção paralela ao eixo da pista. Também podem ser dos tipos curta e longa quando apresentarem extensão de até 100 cm e superiores a 100 cm, respectivamente.
 - Trinca "Couro de Jacaré": trincamento caracterizado por trincas interligadas não apresentando direções específicas, podendo ou não apresentar erosão nas bordas.
- Trincamentos Não Relacionados com o Fenômeno de Fadiga: são classificados dois tipos de trincamento para esse caso, trincas por retração e trincas em blocos, segundo definição em DNIT (2003), temos:
 - Trinca de Retração: esse tipo de trincamento se apresenta em forma de trincas isoladas e seu aparecimento está relacionado ao fenômeno de retração térmica do material do revestimento ou do material da base.
 - Trinca em Bloco: caracterizada por trincas interligadas que apresentam conformação de blocos, podendo apresentar erosão nas bordas.

O trincamento é um processo natural que tende a ocorrer em algum momento durante o tempo de utilização do pavimento, solicitações de tráfego, que degradam o pavimento tanto estruturalmente (tensões aplicados pelos veículos) quanto superficialmente (desgaste superficial devido à passagem de veículos), e variações climáticas (temperatura e umidade) são os processos normalmente envolvidos. Segundo Rodrigues (1991), o trincamento é a principal causa da queda de desempenho em pavimentos rodoviários. Montestruque e Rodrigues (1995) citam que o trincamento é que governa a manutenção estrutural, o que dá base para a escolha do tipo de medida de restauração a ser empregada.

Com o aparecimento de trincas na superfície, ocorre a penetração de água para o interior da estrutura do pavimento, que pode vir a se acumular no topo da base ou chegar até o subleito, acelerando, desse modo, o processo de degradação.

Rodrigues (1991) estudou o trincamento dos pavimentos através da mecânica das fraturas e descreveu que existem três movimentos cinemáticos independentes que podem representar o comportamento da trincas, baseados nos modos de deslocamentos relativos das suas superfícies. São os chamados modos de trincamento, que são necessários e suficientes para descrever os modos possíveis de comportamento da trinca. Os modos são descritos como:

- Modo I - Abertura - superfícies são separadas na direção y , mas as deformações são simétricas em relação aos planos xz e xy ;
- Modo II - Cisalhamento - há um escoamento de uma superfície sobre a outra na direção x , onde as deformações são simétricas em relação aos planos xy e anti-simétricas em relação ao plano xz ;
- Modo III - Rasgamento - há um escorregamento das superfícies da trinca na direção z , de modo que as deformações nos planos xy e xz são anti-simétricas.

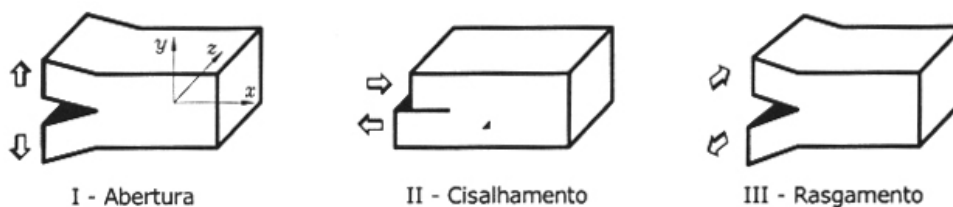


Figura 2.2 - Modos de Fratura (Medina e Motta, 2005)

Medina e Motta (2005) classificam os modos como Modo I - abertura por tração com deslocamento perpendicular às faces das trincas, Modo II - cisalhamento puro com deslocamento das partes trincadas paralelamente a si mesmas e Modo III - cisalhamento com torção ou rasgamento com o deslocamento para fora do plano de trincamento. Cada um dos modos está associado a um fator de intensidade de tensões (K), sendo K_1 para o modo 1, K_2 para o modo 2 e, conseqüentemente, K_3 para o modo 3.

A lei de Paris (Paris e Erdogan, 1963), que descreve a taxa de propagação das trincas em função dos fatores de intensidade de tensão e de características dos materiais é apresentada abaixo, através da equação (2.1).

$$\frac{dc}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (2.1)$$

onde,

c = comprimento da trinca;

N = número de ciclos de carga;

A, n = propriedades de fratura das misturas asfálticas determinadas experimentalmente;

ΔK = amplitude da variação do fator de intensidade de tensões, que é dependente da geometria da estrutura do pavimento, modo de fratura e comprimento da trinca.

O número de ciclos necessários para propagar a trinca é obtido através de integração da equação (2.2), abaixo apresentada.

$$N_f = \int_0^h \frac{dc}{A(\Delta K)^n} \quad (2.2)$$

Zhou e Scullion (2005) citam que a mecânica da fratura vem sendo amplamente utilizada na previsão de trincamento de pavimentos (trincamentos ocasionados por fadiga, por baixas temperaturas e reflexão). Segundo Medina e Motta (2005), a mecânica da fratura torna possível desenvolver modelos de deterioração de pavimentos por trincamento através de análise mecanística.

DNIT (2006) descreve os principais tipos de trincamento (trincamentos por fadiga, trincamentos por envelhecimento do ligante asfáltico, trincamentos por reflexão e trincamentos resultantes da variação de temperatura) indicando suas características e os mecanismos envolvidos em cada caso.

O trincamento por fadiga ocorre devido às repetições sucessivas de carregamento, decorrentes do tráfego de veículos, e tem como característica final às trincas do tipo "Couro de Jacaré".

Fadiga, segundo Montestruque e Rodrigues (1995), se trata da deterioração que vai se acumulando em um elemento estrutural devido às solicitações de carga, tendo como consequência, na maior parte das vezes, a ruptura do mesmo. No caso de pavimentos, como característica do fenômeno de fadiga, temos os trincamentos nas trilhas de roda.

Quando a formação se dá através da propagação de trincas existentes em uma camada inferior, atingindo então a superfície da nova camada de revestimento asfáltico, temos o chamado trincamento por reflexão, cujas trincas podem aparecer sob qualquer forma.

O trincamento por envelhecimento está relacionado com o envelhecimento do ligante asfáltico, que rompe por não suportar mais as deformações ocasionadas pelas variações de temperatura. O envelhecimento dos ligantes asfálticos se dá por diversos mecanismos, sendo os mais significativos os referentes à perda de componentes voláteis e a reação do asfalto com o oxigênio. As trincas por envelhecimento se caracterizam por apresentarem forma irregular e espaçamentos maiores que 50 cm.

No caso dos trincamentos resultantes da variação de temperatura, quando ocorre uma redução significativa de temperatura, temos o aparecimento de trincas transversais e longitudinais, cujo espaçamento será função das características dos materiais empregados na mistura e da variação de temperatura. As trincas longitudinais também estão relacionadas com a umidade no acostamento, no caso de trincas nas bordas do pavimento, ou com recalques ou ruptura de aterros, que por sua vez pode originar trincas parabólicas além das longitudinais.

Com o surgimento de fissuras no pavimento ocorre a penetração das águas pluviais através de sua superfície, podendo inclusive alcançar sua estrutura, o que por sua vez vai ter uma influência muito grande na sua durabilidade. Essa perda de impermeabilidade é apontada por Maroni e Montez (1995) como uma das principais consequências negativas da fissuração.

Freitas *et al.* (2003) citam o tipo de trincamento cuja característica é iniciar a partir da superfície do revestimento asfáltico. Este trincamento é chamado de *top-down cracking* (TDC) e, segundo os autores, tem sido observado em países de clima temperado. Suas causas

ainda não são totalmente conhecidas, porém fatores como condições climáticas, tráfego, idade do pavimento bem como condições da estrutura e qualidade na construção estão relacionados.

Matsumo e Nishizawa (1992) citam que inicialmente os pesquisadores alegavam que as tensões geradas pelo contato entre a borda dos pneus e a superfície do pavimento causavam o aparecimento de pequenas trincas. Muitas dessas trincas por sua vez acabavam por desaparecer nos momentos em que a rigidez do revestimento estava baixa devido às altas temperaturas. Porém quando a temperatura voltava a cair, a superfície se contraía e as trincas anteriormente geradas se tornariam trincas do tipo *top-down cracking* (TDC).

Crow (1990) sustenta que apenas a combinação entre uma grande dissipação de energia na superfície, tensões cisalhantes, tensões induzidas pela temperatura e tensões residuais podem causar trincamentos na superfície.

Segundo Svasdisant *et al.* (2002), o início e a propagação deste tipo de trincamento seguem três etapas:

- Aparecimento de uma trinca longitudinal isolada fora da trilha de roda;
- Ao longo do tempo se desenvolvem outras trincas paralelas a trinca inicial;
- Ambas as trincas paralelas se unem através de trincas transversais.

O autor também defende que a TDC é ocasionada por altas tensões devido ao carregamento imposto pelo tráfego, gradientes de temperatura, envelhecimento e qualidade da construção (materiais empregados, compactação e pavimentação).

Os afundamentos são classificados por DNIT (2003) em afundamentos plásticos e afundamentos de consolidação, ambos podem ainda ser do tipo local ou de trilha de roda, isso vai depender de sua localização.

- Afundamento Plástico: caracteriza-se pelo afundamento acompanhado de solevamento, causado pela fluência plástica tanto de alguma das camadas do pavimento quanto do subleito. É denominado afundamento plástico local quando tiver extensão de até 6 m, no

caso da extensão ser superior a 6 m e ao longo da trilha de roda, temos o chamado afundamento plástico de trilha de roda.

- Afundamento de Consolidação: trata-se de afundamento sem solevamento, causado pela consolidação diferencial em camadas do pavimento ou do subleito. É denominado afundamento de consolidação local quando tiver extensão de até 6 m, no caso da extensão ser superior a 6 m e ao longo da trilha de roda, temos o chamado afundamento de consolidação de trilha de roda.

O solevamento se caracteriza como a diferença de altura entre o perfil original da rodovia e a protuberância formada pelo revestimento na borda do afundamento, isso pode ser melhor observado na Figura 2.3.

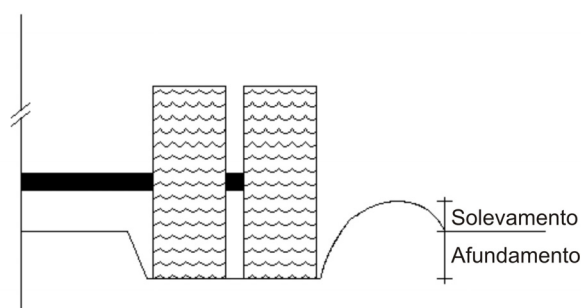


Figura 2.3 - Representação do Afundamento e do Solevamento

A deformação permanente na trilha de roda é causada pela consolidação de uma ou mais camadas do pavimento e se caracteriza por uma distorção na superfície do mesmo. (Yoder e Witczac, 1975).

DNIT (2006) cita os tipos de deformações permanentes que se manifestam em pavimentos asfálticos e as divide quanto a sua ocorrência estar associada aos carregamentos de tráfego ou não (Tabela 2.1). Temos como deformações permanentes os afundamentos em trilha de rodas, as deformações plásticas no revestimento e as depressões.

Tabela 2.1 – Deformações permanentes, causas e associação com o carregamento de tráfego
(DNIT, 2006)

Causa Geral	Causa específica	Exemplo de defeito
Associada com o carregamento	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo (creep)
	Grande número de repetições de carga	Afundamento nas trilhas de roda
Não associada com o carregamento	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

Ainda segundo DNIT (2006), existem três situações a se considerar para que se entenda o carregamento de tráfego como causador de deformações:

- quando os esforços induzidos nos materiais constituintes dos pavimentos são suficientes para causar cisalhamento, promovendo deslizamentos no interior do material;
- carregamentos estáticos ou de longa duração podem causar afundamentos em materiais de comportamento viscoso;
- um grande número de repetições de cargas de pressões reduzidas podem causar pequenas deformações que se acumulam ao longo do tempo e se manifestam como afundamentos canalizados nas trilhas de roda.

2.3 REFLEXÃO DE TRINCAS

2.3.1 Origens

Define-se reflexão de trincas como o fenômeno observado quando as trincas existentes na camada antiga e degradada se propagam, atingindo a superfície da nova camada de revestimento. Na realidade é como se as trincas seguissem sua trajetória normal, no caso, através da nova camada. Esse fenômeno tem origem nas tensões geradas em torno das trincas no pavimento antigo, tensões essas devido a deflexões diferenciais, movimentos de abertura e fechamento das trincas e variações de temperatura e umidade (Pereira e Motta, 2001).

Segundo Amini (2005), a reflexão de trincas é um dos fatores mais significativos na deterioração dos pavimentos (camada de recapeamento), e tem como causa, as tensões de

tração e cisalhamento induzidas na camada do pavimento pelos carregamentos oriundos do tráfego, as variações de temperatura, os solos expansíveis no subleito, as variações nas misturas, as trincas existentes no pavimento antigo, e as movimentações de trincas e juntas no contato entre as camadas do pavimento antigo e restaurado.

De acordo com NCHRP (2004) essas movimentações podem ser verticais, devido ao carregamento imposto pelo tráfego, ou horizontais, devido às variações de temperatura, no entanto, é provável que sejam uma combinação dos dois movimentos.

Métodos para controlar a reflexão de trincas e aumentar a vida útil das camadas consideram a importância e a efetividade da espessura de camada e especificações das misturas asfálticas empregadas (Shukla e Yin, 2004).

As fissuras nas extremidades das trincas tem a tendência de se movimentar, tanto por efeitos térmicos quanto por efeitos do tráfego, tendo em vista que as extremidades são pontos de concentração de tensões. Logo essas tensões serão transmitidas para a nova camada, resultando na reflexão das trincas (Maroni e Montez, 1995).

Segundo Zhou e Scullion (2005), a reflexão de trincas é resultado da combinação de três mecanismos, sendo eles a flexão, cisalhamento e esforços ocasionados pela temperatura. O carregamento de tráfego vai induzir na camada dois esforços de cisalhamento e mais um de flexão e esses esforços, por sua vez, serão então afetados pelas temperaturas diárias.

2.3.2 Mecanismos de Controle

De modo a se buscar o controle da reflexão do trincamento em pavimentos asfálticos, uma série de procedimentos tem sido desenvolvidos e aplicados, dentre eles o emprego de geotêxteis, camadas intermediárias de alívio de tensões, camadas de dissipação de trincas, aumento na espessura do recapeamento, reciclagem do revestimento existente e utilização de ligantes modificados. Abaixo se faz uma breve descrição sobre cada um dos itens relacionados (Bernucci *et al.*, 2007).

- Emprego de geotêxteis: atuam de duas maneiras, desviando as trincas ou as convertendo em microfissuras ao se propagarem. Também protegem a estrutura do pavimento, quanto a penetração das águas decorrentes das chuvas;
- Camadas de alívio de tensões: chamadas de SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), são executadas na superfície da camada deteriorada do pavimento, e atuam na dissipação de movimentos e tensões em trincas e juntas;
- Camadas de dissipação de trincas: camadas granulares, podendo ser misturas com pequeno teor de ligante asfáltico, executadas sobre o revestimento deteriorado e, devido ao seu elevado volume de vazios, acabam por interromper a propagação das trincas;
- Aumento da espessura de recapeamento: reduz a velocidade de propagação e a severidade das trincas refletidas. Tem como mecanismo de atuação a redução dos esforços de flexão e cisalhamento e redução na variação de temperatura na camada de revestimento;
- Reciclagem do revestimento existente: utilizada para reduzir ou eliminar camadas com trincas com potencial de reflexão. É realizada com os materiais existentes fresados, podendo ter adições e incorporações de ligantes novos, emulsões asfálticas, dentre outras;
- Ligantes modificados: são utilizados ligantes modificados por polímeros ou borracha moída de pneus que apresentem baixa rigidez, de modo a se conseguir uma menor absorção de tensões e conseqüente retardamento na reflexão das trincas.

Columbier (1989) cita a aplicação de camada intermediária entre a camada de revestimento trincada e a nova camada, como uma das atividades que podem ser empregadas para retardar a propagação do trincamento. A camada intermediária vai atuar, retardando o aparecimento da trinca na superfície, segundo três princípios básicos, a divisão do trincamento em segmentos menores, o redirecionamento da trinca, e o desvio da trajetória da trinca.

Tendo em vista o presente trabalho tratar especificamente do emprego de geotêxteis como sistema anti-reflexão de trincas, uma abordagem maior será dada nesse sentido nos capítulos seguintes.

2.4 UTILIZAÇÃO DE GEOTÊXTEIS

Geotêxteis vem sendo utilizados em pavimentação desde a década de 60 nos Estados Unidos. Nos países da América do sul chegou alguns anos mais tarde, na década de 70. Foram nas

décadas de 80 e 90 que ocorreram maiores estudos, tanto de laboratório quanto de campo, sobre seu funcionamento e também, por consequência, sua maior utilização (Maroni e Montez, 1995).

Dentre os estudos de campo realizados no Brasil podemos citar o da rodovia DF-003 em 1984, no Distrito Federal, o da rodovia RS/342 em Março de 2000, no Rio Grande do Sul, e os das rodovias Rio/Teresópolis e Estrada do Encantamento.

Na rodovia DF-003, foram executados trechos com e sem geotêxteis, monitorados por um período de sete anos, cujos resultados apontaram que o geotêxtil aumentou a vida de fadiga da camada de reforço, evitou o bombeamento de finos do solo da camada de base e pode permitir uma redução da espessura da camada de reforço. Maiores detalhes da pesquisa podem ser obtidos em Rodrigues *et al.* (1991).

Oliveira *et al* (2000), realizaram na rodovia RS/342 um estudo de desempenho de geotêxteis no processo de retardo da reflexão de trincas, o trecho em questão se localiza entre os Km's 19,20 e 20, tendo extensão total de oitocentos metros. Núñez *et al.* (2008) apresentaram os resultados da continuidade do monitoramento realizado na rodovia, com dados obtidos entre os anos de 2000 e 2006.

Pereira e Motta (2001) realizaram avaliação em dois trechos com camada intermediária de geotêxtil na Rodovia Rio/Teresópolis e na Estrada do Encantamento, ambos no estado do Rio de Janeiro. Na análise verificaram um aumento da vida útil do trecho na Rodovia Rio/Teresópolis, que se deu, segundo os autores, devido à estabilização dos blocos trincados do revestimento e também pela redução nas deflexões. No trecho da Estrada do Encantamento não foi observada redução nas deflexões, sendo levantado o fato da execução ter sido feita de maneira defeituosa.

Montestruque e Rodrigues (1995) obtiveram curvas de fadiga através de ensaios de flexão alternada em vigotas com e se geotêxteis e chegaram a resultados que permitiram concluir que a inclusão de geotêxteis impregnados com asfalto na camada intermediária entre pavimento trincado e camada recapeada retarda a reflexão de trincas uma vez que ocasiona o

redirecionamento horizontal da mesma. Também foi observado que com a inclusão do geotêxtil na zona tracionada do revestimento asfáltico se consegue um aumento da vida de fadiga da camada. Os autores concluíram que a compactação do geotêxtil impregnado com asfalto é de grande importância, pois afeta sua resistência à tração e sua permeabilidade, propriedades de grande importância quando da reflexão completa da trinca e no que diz respeito ao aumento da vida de fadiga.

No caso dos estudos realizados em pistas experimentais podemos citar o realizado na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos da UFRGS, estudo esse que teve início em 1999 e tem como objeto de estudo os geotêxteis quando empregados de forma a retardar a reflexão de trincas em recapeamentos asfálticos. A pista construída vem então sendo monitorada, porém não de forma contínua, isso se deve ao fato do simulador de tráfego também ser utilizado em outras pesquisas. Na presente dissertação se dará continuidade aos estudos previamente realizados, Viera (2002) e Núñez *et al.* (2008), sendo os dados referentes à parte inicial dos trabalhos, bem como ao monitoramento recente, encontrados nos capítulos seguintes.

Os geotêxteis, que fazem parte do grupo dos geossintéticos junto com as geomembranas, as geogrelhas e os geocompostos, tem se mostrado como materiais extremamente versáteis e com excelente relação custo benefício para modificação do solo. Seu modo de operação é descrito por seis funções básicas (separação, filtração, drenagem, reforço, selagem e proteção), sendo que nem todas se apresentam simultaneamente, isso vai depender da aplicação para a qual será empregado (Meccai e Hasan, 2004).

Segundo a norma ABNT (2003), os geotêxteis são definidos como sendo um produto têxtil permeável, tendo cinco funções básicas (drenagem, filtração, proteção, reforço e separação) podendo ser de dois tipos distintos: geotêxteis tecidos e geotêxteis não-tecidos. Essa classificação é feita de acordo com sua estrutura e técnica de manufatura.

Os geotêxteis tecidos são compostos através do entrelaçamento de fios, filamentos, laminetes (fitas) ou outros componentes, sendo que os fios são dispostos em duas direções, ambas relativas a direção de fabricação do mesmo. Os fios então podem ser dispostos transversalmente a direção de fabricação do geotêxtil (trama) ou longitudinalmente (urdume).

Os geotêxteis não-tecidos são compostos por fibras ou os filamentos distribuídos aleatoriamente, sendo interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos. Os processos de ligamento das fibras podem se dar então por entrelaçamento mecânico das fibras ou dos filamentos (agulhado), por processo térmico de estabilização da posição das fibras (termofixado), através de fusão parcial por aquecimento (termoligado) ou então por meio de produtos químicos (resinado).

Ceratti e Rodrigues (2004) relatam que os geotêxteis recomendados para utilização em pavimentação são os do tipo não tecidos, de poliéster ou polipropileno com gramatura maior ou igual a 150 g/m², espessura maior ou igual a 1,50 mm, resistência a tração maior ou igual a 7 kN/m (NBR 12824), ponto de amolecimento maior ou igual a 180° C e capacidade de retenção de ligante betuminoso maior do que 0,9 L/m² (Texas DOT-3099).

Os autores seguem relatando que geossintéticos vão atuar de dois modos específicos, sendo eles o desvio das trincas, no caso dos geotêxteis impregnados com asfalto, e a conversão em microfissuras no caso das geogrelhas. Quando se faz uso do geotêxtil se consegue uma taxa de pintura de ligação bem maior do que se conseguiria sem o geotêxtil. Como o asfalto apresenta alta rigidez sob pulsos de tensões de curta duração (tráfego de veículos em alta velocidade), isso vai garantir a adequada transmissão de esforços entre as camadas e também a proteção da camada inferior do recapeamento contra deformações de tração. No caso das movimentações de natureza térmica (lentas), a baixa rigidez que o asfalto apresenta sob pulsos de tensões lentas vai produzir um certo grau de desacoplamento entre as camadas, que por sua vez vai acabar por retardar o processo de reflexão do trincamento.

Segundo Wickert (2002), este fenômeno de retardamento da propagação das trincas ocorre, pois a estrutura geotêxtil/asfalto forma uma camada de descontinuidade visco-elástica que minimiza a intensidade das tensões sobre a trinca existente no momento de solicitação da carga de roda e/ou efeito térmico. O sistema composto pelo geotêxtil impregnado com asfalto tem um comportamento rígido sob tensões rápidas produzidas pelo tráfego e quando sob tensões lentas de origem térmica tem um comportamento dúctil.

A dissipação de energia é desviada a partir da formação de novas superfícies livres na zona crítica do recapeamento, fazendo com que a trinca se propague horizontalmente na interface Geotêxtil-Asfalto (Vilchez, 1996 e Rodrigues, 1998).

Diversos estudos apontaram que a instalação é um processo de grande importância para que se obtenha do geotêxtil a função desejada. Amini (2005) apresenta procedimento básico a ser seguido quando da instalação dos geotêxteis. De acordo com seus estudos, o uso de geotêxteis mostrou-se bastante efetivo na redução do trincamento por reflexão. Porém, no caso de camadas delgadas de recapeamento, a redução da reflexão se deu de maneira bem reduzida.

Segundo o autor, o procedimento padrão para instalação dos geotêxteis consta das seguintes etapas:

- Limpeza da superfície com posterior selagem das trincas existentes;
- Aplicação de emulsão asfáltica;
- Instalação dos geotêxteis;
- Compactação;
- Nova aplicação de emulsão asfáltica.

Maxim Technologies (1997), no relatório final de estudo realizado sobre o emprego de geotêxteis não tecidos em pavimentação, relata que o uso de geotêxteis não tecidos como camada intermediária ocasiona um ganho significativo no desempenho da nova camada de concreto asfáltico, sendo esse ganho resultado das capacidades de impermeabilização e absorção de tensões dos geotêxteis. O sistema de geotêxteis forneceu um ganho de desempenho a camada de concreto asfáltico equivalente a um aumento de 2,50 a 4,50 cm em sua espessura.

A camada intermediária de geotêxtil não foi feita para ser utilizada como camada estrutural com finalidade de mascarar deficiências do pavimento, bem como essa relação de equivalência pressupõe que o pavimento existente é estável e que a nova camada de concreto asfáltico possui espessura mínima de 4 cm. Nos casos em que o benefício proporcionado pelo emprego da camada intermediária de geotêxtil se mostrou nulo ou limitado, foram observadas duas condições básicas, sendo elas a deterioração excessiva da camada antiga do pavimento e camadas de recapeamento executadas com espessura inferior a 4 cm.

Podemos citar também a taxa de emulsão aplicada na camada de ligação como um fator importante a ser observado para o bom desempenho dos geotêxteis, isso foi observado por alguns autores e tem como consequência o descolamento e posterior escorregamento da manta asfáltica.

Pereira e Motta (2001) relatam a insuficiência na aderência como sendo a principal das causas de insucessos quando da utilização de geotêxteis, esse problema de aderência está ligado principalmente à taxa de emulsão aplicada como camada de ligação entre a manta geotêxtil e as camadas do revestimento. Relatam ainda que a situação se torna mais problemática em regiões de frenagem, tangentes de curvas e nos pontos de mudança de faixa, nesses pontos se tem uma desaceleração por parte dos veículos, o que por sua vez gera um aumento de tensões horizontais que acarretam um descolamento da manta e posterior escorregamento da mesma, levando consigo a camada de recapeamento.

Oliveira *et al.* (2001) também relatam escorregamento da capa asfáltica, em um ponto isolado no trecho experimental utilizado no estudo, devido a problemas com a taxa de emulsão empregada na capa de ligação da manta geotêxtil.

2.5 ENSAIOS ACELERADOS

A realização de ensaios acelerados tem por objetivo reproduzir a deterioração que um pavimento irá apresentar ao longo do seu período de projeto, porém numa escala de tempo menor, ou seja, em curto prazo. Com esse tipo de ensaio se tem um auxílio no processo de tomada de decisão para utilização de novos materiais e no desenvolvimento de procedimentos para análise da relação custo-benefício de estratégias alternativas a serem empregadas tanto no caso de construção de um pavimento novo quanto em casos de restauração (Gonçalves, 2002).

Fritzen (2005) cita como principal objetivo na realização dos ensaios acelerados, a reprodução, em curto espaço de tempo, da deterioração que ocorreria durante a vida de projeto de um determinado pavimento, sendo esse tipo de ensaio, o mais representativo do desempenho real dos pavimentos do que os ensaios, em escala reduzida, realizados em

laboratório. Essa comparação é feita no que diz respeito aos fatores laboratório-campo utilizados, que no caso dos ensaios de laboratório são valores altos, o que não ocorre quando do emprego de simuladores de tráfego, onde os fatores são baixos.

Segundo Coetzee *et al.* (2000), ensaios acelerados em escala real de pavimentos tiveram seu início em 1909, através de uma pista experimental localizada em Detroit, sendo que após esse acontecimento várias instalações a nível mundial foram construídas em centros de pesquisa para realização da mesma atividade.

Essa atividade foi definida no NCHRP (1996) como a aplicação controlada de carregamento, carregamento esse igual ou superior ao permitido legalmente para aplicação experimental ou real em um sistema de pavimento com camadas estruturais, de modo a determinar a sua resposta e desempenho sob acumulação controlada e acelerada de danos, tudo isso em um pequeno período de tempo.

Ainda segundo NCHRP (1996), existem basicamente três tipos de equipamentos: aqueles em que a carga é aplicada através de rodas girando ao redor de um pilar central em uma pista circular (exemplo, *Manège de Fatigue* na França); equipamentos lineares, onde a roda se move linearmente através de seção de teste (exemplo, *Heavy Vehicle Simulator* - HVS); e outros onde o movimento da roda se dá de forma livre, mas normalmente através de pistas com forma circular ou oval, nessa categoria também se incluem os casos de uso de veículos controlados remotamente circulando nas pistas de teste (exemplo, equipamento localizado na Espanha e veículos controlados remotamente no Japão no *Public Works Research Institute*).

Núñez (1997) relata que entre o final dos anos 40 e início dos anos 60 ocorreram três experimentos sob condições controladas que foram o marco na análise experimental de pavimentos, sendo eles o *Maryland Road Test*, o *WASHO Road Test* e o *AASHTO Road Test*. Os objetivos, os resultados e as contribuições destes experimentos são:

- *Maryland Road Test*: teve por objetivo determinar os efeitos relativos de níveis diferentes de carregamento em um pavimento de concreto e foi realizado no estado de Maryland em um trecho de 2 km construído em 1941.

- *WASHO Road Test*: tinha os mesmo objetivos do experimento em Maryland porém em pavimentos flexíveis e foi realizado no estado de Idaho. Como resultados desse experimento temos, de acordo com Huang (1993):
 - O estabelecimento de equivalências entre eixos simples e tandem, em termos de degradações e deflexões;
 - A observação de que a pavimentação do acostamento retardava a degradação da trilha externa das seções experimentais;
 - As deflexões dos pavimentos eram influenciadas pela velocidade do veículo, carregamento e teor de umidade das camadas superiores do subleito.
- *AASHTO Road Test*: teve como principal objetivo determinar uma relação significativa entre o número de repetições de eixos, com cargas diferentes em magnitudes e arranjos, e o desempenho de pavimentos constituídos por camadas de natureza e espessura variadas. Esse experimento veio a introduzir o conceito de serventia (*serviceability*).

Bernucci *et al.*(2007) relatam que no Brasil temos dois simuladores fixos bastante conhecidos: o do IPR/DNER, que foi construído na década de 70; e o localizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o simulador de tráfego UFRGS/DAER, que foi construído na década de 90. O simulador UFRGS/DAER é abordado de maneira mais detalhada nos capítulos seguintes, tendo em vista que o mesmo foi utilizado na presente pesquisa. Além dos simuladores citados, ainda existem no Brasil simuladores móveis semelhantes aos HVS da África do Sul, construídos pela empresa CIFALI em conjunto com a UFRGS, tendo seu projeto iniciado em 2003 e concluído com a montagem de dois equipamentos em 2004.

O simulador de Tráfego UFRGS/DAER, localizado na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS, foi e vem sendo utilizado em uma série de estudos, sendo o primeiro deles realizado por Núñez (1997), que efetuou a análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados. Dentre os trabalhos realizados na seqüência, podemos citar:

- Albano (1998): investigou os efeitos dos fatores carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu sobre o desempenho de pavimentos. Os dados e informações existentes

sobre o quadro de cargas por eixo praticado pela frota de veículos pesados são razoáveis e a ação conjunta dos referidos fatores é ainda uma questão pouco explorada. Para compensar a escassez de dados sobre pressão de inflação e tipo de construção de pneus utilizados na frota de carga, programou-se uma pesquisa de campo na rodovia estadual RS/240. As informações oriundas da pesquisa demonstram que há um acréscimo generalizado no valor da pressão dos pneus e um aumento de uso dos pneus de fabricação radial em relação aos pneus convencionais. Os dados de campo subsidiaram a programação de um experimento fatorial cruzado executado na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS/DAER. A variação dos níveis dos fatores deu-se através de um simulador linear de tráfego atuando sobre uma pista experimental com 20 m de comprimento por 3,5 m de largura.

- Viera (2002): estudou o desempenho de um pavimento flexível com camada intermediária de geotêxtil. A pista experimental tem estrutura representativa dos pavimentos existentes no Rio Grande do Sul: camada final de terraplenagem de argila laterítica, sub-base de macadame seco, base de brita graduada, camada de CBUQ de 4 cm e camada de recapeamento de 5 cm em CBUQ. A pista foi dividida em três seções, sendo duas com camada intermediária de geotêxteis e uma sem camada intermediária, e duas faixas, Faixa A e Faixa B. Durante o período de estudo a Faixa A foi solicitada por mais de 80.000 ciclos de carga e a Faixa B por mais de 345.000 ciclos de carga. O estudo explicitou a influência da temperatura do pavimento na deformabilidade plástica do concreto asfáltico, mostrou a eficiência do geotêxtil no desvio da direção de propagação das trincas e também foram propostos pela autora, modelos estatísticos que permitem estimar a temperatura no interior do pavimento em função da temperatura do ar e da irradiação solar.
- Gonçalves (2002): realizou estudos com o propósito de compreender e quantificar o desempenho de estruturas de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico submetidas a ensaios acelerados em escala real com um simulador linear de tráfego, sendo o pavimentado também instrumentado com medidores de tensões e deformações. Os resultados das avaliações realizadas revelam que os módulos de elasticidade retroanalisados do FWD e da viga eletrônica se mostraram adequados à interpretação do desempenho estrutural dos pavimentos experimentais. Em contrapartida, os módulos de elasticidade derivados de ensaios laboratoriais, realizados em diferentes épocas, não refletiram as condições apresentadas pelos pavimentos no campo.

- Azambuja (2004): seu estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de recapeamentos asfálticos, aplicados sobre pavimentos severamente trincados, através do acompanhamento da degradação ocorrida em função do tráfego. Foram testados dois tipos de recapeamentos, sendo uma camada de 5,6 cm de espessura em concreto asfáltico convencional e um tratamento superficial duplo, modificado por polímero SBS. Os recapeamentos foram aplicados sobre uma pista experimental já trafegada e realizou-se, artificialmente, um trincamento padronizado buscando reproduzir efeitos similares àqueles provocados pelo fenômeno de fadiga. A solicitação do pavimento se deu através da utilização de um simulador linear de tráfego, sendo aplicada uma carga de semi-eixo de 50 kN que, por sua vez, proporcionou a degradação do pavimento em três meses de ensaio para cada recapeamento. O monitoramento do pavimento foi feito pelo levantamento periódico de deflexões, bacias deflectométricas, afundamentos de trilha de roda e o controle do surgimento de trincas na superfície. Além disso, foi feita instrumentação da pista experimental com sensores (células de tensão total e strain gages) na interface entre pavimento trincado e recapeamentos. Durante os períodos de ensaio, foram monitoradas também as condições pluviométricas e temperaturas do ar e pavimento. A determinação dos módulos elásticos das camadas das estruturas testadas foi efetuada pela aproximação das bacias obtidas em campo com os dados gerados em uma simulação numérica, através do programa computacional FLAPS. A autora percebeu que, além do tráfego, o trincamento no recapeamento em tratamento superficial foi devido à condição estrutural inicial do pavimento existente, severidade do trincamento artificial incompatível com a espessura desse tipo de restauração e baixas temperaturas. Quanto ao recapeamento em concreto asfáltico, o maior trincamento surgiu em áreas sem trincas artificiais subjacentes, partindo do fundo da camada asfáltica do pavimento existente, em função da pouca rigidez da camada granular.
- Cruz (2005): realizou estudo comparativo de desempenho de recapeamento com misturas formuladas com ligante convencional e misturas utilizando asfalto-borracha. Do estudo realizado a autora observou intenso trincamento no concreto asfáltico convencional contra apenas uma trinca no concreto com asfalto-borracha.
- Wickboldt (2005): realizou a avaliação da eficiência de um recapeamento constituído por mistura de asfalto-borracha (processo via-úmida), no retardamento de reflexão de trincas, através da técnica de ensaios acelerados. A condição estrutural do pavimento foi

monitorada através de medidas de deflexões e dados de instrumentação (tensões e deformações), a condição funcional foi monitorada através de levantamento de afundamento de trilha de roda e macro e micro textura. A autora constatou que o emprego do asfalto-borracha retardou em cinco vezes o surgimento de trincas, conferindo, globalmente, melhores condições funcionais e estruturais ao pavimento quando comparado a um recapeamento convencional de mesma espessura.

- Rohde (2007): estudou misturas asfálticas com módulos de resiliência elevados (EME), para emprego em camadas estruturais de pavimentos. Para caracterização e verificação de desempenho foram realizados os ensaios da metodologia Marshall, ensaios de resistência a tração, módulo de resiliência à compressão diametral, fadiga a tensão controlada, resistência ao dano por umidade induzida (Método Lottman Modificado), perda de massa por desgaste (Cântabro) e deformação permanente (crrep dinâmico e simulador tipo LCPC). Tendo em vista a verificação de aspectos construtivos, bem como monitorar o desempenho da estrutura foi construída uma pista experimental, que foi solicitada por simulador de tráfego. O monitoramento se deu através de medidas de deflexões, afundamentos de trilha de roda e inspeções visuais para verificar o trincamento superficial. Com base nos resultados obtidos durante o estudo, a autora conclui que o emprego de misturas asfálticas de modulo elevado em camadas estruturais de pavimentos irá permitir a construção de estruturas de melhor qualidade técnica, podendo contribuir para o aumento da vida útil das rodovias.

2.6 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

Prever o desempenho de um pavimento não é das tarefas mais simples, visto que existem uma série de fatores influenciando o processo de desgaste que o mesmo vai sofrer durante sua vida de projeto. Segundo Paterson (1987), os modelos de previsão de desempenho são estabelecidos de modo a prever a velocidade de alteração dos valores dos parâmetros que controlam as condições funcionais e estruturais de um pavimento. AASHTO (1990) define o desempenho como sendo a capacidade do pavimento em atender seus objetivos ao longo do tempo.

Segundo Lytton (1987) e HAAS *et al.* (1994), os modelos são divididos em duas categorias: determinísticos e probabilísticos, sendo os primeiros caracterizados por lidar com as respostas

primárias, estruturais e de deterioração, e os segundos com a curva de vida remanescente do pavimento. Os autores fazem ainda uma subdivisão dos modelos em quatro grupos distintos:

- Modelos puramente mecânicos: baseados em parâmetros estruturais (tensões, deformações e deflexões);
- Modelos empírico-mecânicos: fazem a integração entre um modelo estrutural do pavimento e uma base experimental. São constituídos de um modelo teórico baseado no comportamento mecânico dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, modelo que tem por objetivo explicar ou prever a deterioração da estrutura sob a repetição de cargas do tráfego, e por funções de transferência, que servem para calibração do modelo (Fritzen, 2005 e Gonçalves, 2007);
- Modelos empíricos ou de regressão: modelos que refletem o desempenho observado em rodovias em serviço, sendo função de poucos parâmetros ou então de índices que buscam caracterizar a estrutura do pavimento, o tráfego e o clima;
- Modelos probabilísticos: modelos em que a experiência de engenheiros e de técnicos é formalizada por meio de processos de transição, como por exemplo, o processo de Markov (Yshiba e Fernandes Junior, 2005).

Segundo Gonçalves (2007) os modelos empírico-mecânicos consistem basicamente de três componentes fundamentais:

- Modelo Mecânico: utilizado no cálculo das respostas do pavimento à passagem das cargas do tráfego, sendo as mesmas expressas na forma de tensões, deformações e deflexões em toda a estrutura;
- Teoria: faz a associação entre as respostas calculadas e a geração e progressão dos defeitos, dentre os quais se pode citar as trincas de fadiga nas camadas asfálticas e cimentadas e as deformações plásticas devido ao acúmulo de deformações permanentes em todas as camadas;
- Calibração Experimental: se faz necessária para incluir os efeitos de fatores que não puderam ser tratados de forma adequada pelo modelo teórico. Nesses fatores estão incluídas as variáveis ambientais (clima, drenagem) e características específicas do tráfego.

Os modelos empíricos, quando comparados aos empírico-mecanísticos, são menos confiáveis, isso se deve ao fato de serem válidos apenas dentro das condições (estruturais, climáticas, de tráfego e materiais de construção) referentes aos trechos experimentais de onde tiveram origem. Esses modelos também na maioria das vezes não fornecem informações sobre a evolução dos defeitos ao longo do tempo (Gonçalves, 2007).

No presente estudo, o que se busca são Modelos de Previsão de Desempenho para o caso particular da Reflexão de Trincas, que consiste basicamente no reaparecimento, na superfície da nova camada asfáltica, de trincas presentes na camada inferior e deteriorada.

Wu *et al.* (2006) relatam que os modelos constitutivos apresentados na literatura, para descrever o trincamento em concreto asfáltico, são baseados basicamente na mecânica da fratura clássica, na mecânica do dano contínuo (*continuum damage mechanics – CDM*), em modelos coesivos de trincamento (*cohesive crack model – CCM*), na energia dissipada na deformação lenta (*dissipated creep strain energy – DCSE*) e em modelos baseados em microestrutura.

Segundo Zhou e Scullion (2005), a reflexão de trincas é um processo de propagação do trincamento que pode ser perfeitamente modelado pelos modos de fratura I e II. A mecânica da fratura, portanto, se torna a ferramenta mais adequada para realizar essa modelagem.

Eltahan e Lytton (2000) citam que os modelos desenvolvidos para previsão de reflexão de trincas em pavimentos flexíveis não incorporaram explicitamente o efeito combinado das áreas trincadas e não trincadas do pavimento original, o que segundo os autores, afeta a precisão na previsão da propagação do trincamento por reflexão. Faz-se necessário, portanto, um modelo que leve em conta essa relação, o que tornará então a previsão da reflexão de trincas mais realista.

Dentre os modelos de previsão existentes na literatura para o caso de reflexão de trincas, podemos citar os propostos por Coelho e Queiroz (1985), DNER (1985), Rolt *et al.* (1996), o modelo empírico-mecanístico proposto por Eltahan e Lytton (2000), os modelos dos programas HDM nas versões 3 e 4 e o modelo empírico constante do projeto NCHRP 1-37^A (2004), projeto esse responsável pela criação do novo método de dimensionamento da AASHTO. Esses modelos serão apresentados mais detalhadamente na seqüência.

Cabe ressaltar também o projeto NHCRP 1-41 (*Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays*), que tem por objetivo identificar e desenvolver modelos mecanísticos de previsão de desempenho para reflexão de trincas em pavimentos asfálticos, em conjunto com o desenvolvimento de programas computacionais a serem utilizados tanto em projetos quanto em análises. Esse projeto se encontra atualmente em aberto e os resultados ainda não foram divulgados.

Coelho e Queiroz (1985) apresentam modelo para previsão do ano de início do trincamento após o recapeamento, desenvolvido a partir de dados experimentais das pesquisas PICR e de Avaliação Estrutural de Pavimentos do IPR.

$$AICR = \frac{(212,8 - 0,917CR_b)H^{0,681}}{[(B_a - 19,45)AAN_{0,AICR}]^{0,336}} \quad (2.3)$$

onde,

$AICR$ = ano de início do trincamento após o recapeamento;

CR_b = porcentagem de área trincada antes do recapeamento;

H = espessura do recapeamento (cm);

B_a = deflexão média após o recapeamento (10^{-2} mm);

$AAN_{0,AICR}$ = média anual do número de passagens de carga de eixo padrão pelo método da AASHTO (milhões/ano).

Em DNER (1985) é apresentada equação para previsão de trincamento quando o pavimento passa por restauração em concreto asfáltico.

$$TR_{AR} = (0,248 \times A'_R + 2,257) \times H^{-1,806} \times B_D \times \log N_{A'R} - \Delta ATR \quad (2.4)$$

sendo:

$$A'_R = A_R - A_{RO} : \text{para } (A_R - A_{RO}) > 1,5 \quad (2.5)$$

$$A'_R = \frac{2}{3}(A_R - A_{RO}) + 0,5 : \text{para } (A_R - A_{RO}) \leq 1,5 \quad (2.6)$$

$$N_{A'R} = \frac{N_{P1}}{t(t+1)A_E} [(t+1)^{(A_{RO}+A'_R)} - (t+1)^{A_{RO}}] \quad (2.7)$$

$$B_D = B_A (1 - 0,0687H^{0,415}) \quad (2.8)$$

$$\Delta ATR = (0,248 \times A''_R + 2,257) \times H^{-1,806} \times B_D \times \log N_{A''_R} \quad (2.9)$$

$$AITR = \frac{(212,8 - 0,917 \times TR_c) \times H^{0,681}}{[(B_D - 19,45) \times NMA]^{0,336}} : \text{se } B_D < 20 \text{ usar } B_D = 20 \quad (2.10)$$

$$NMA = \frac{N_{AITR}}{A_R - A_{RO}} \quad (2.11)$$

$$N_{AITR} = \frac{N_{P1}}{t(t+1)^{AE}} [(t+1)^{A_R} - (t+1)^{A_{RO}}] \quad (2.12)$$

$$A''_R = AITR : \text{para } AITR > 1,5 \quad (2.13)$$

$$A''_R = \frac{2}{3} AITR + 0,5 : \text{para } AITR \leq 1,5 \quad (2.14)$$

$$N_{A''_R} = \frac{N_{P1}}{t(t+1)^{AE}} [(t+1)^{(A_{RO}+A''_R)} - (t+1)^{A_{RO}}] \quad (2.15)$$

onde,

TR_{AR} = trincamento do pavimento restaurado no ano A_R ;

A_R = número de anos, a partir do início da operação do pavimento existente, até um ano qualquer dentro do período de análise de uma restauração;

A'_R = número de anos a partir do início de sua operação;

H = espessura de uma camada de restauração (cm);

B_D = deflexão após restauração (10^{-2} mm);

$AITR$ = número de anos decorrido entre o recapeamento e o início do trincamento.

Rolt *et al.*(1996) apresentam modelo de previsão de desempenho, que calcula a probabilidade de ocorrer reflexão de trincas em camadas de revestimento betuminoso delgado. Os fatores que influenciam a taxa de reflexão são a severidade do trincamento, as deflexões antes da nova camada e o volume de tráfego após a nova camada. No estudo, dez trechos de 1 km foram monitorados por um período de cinco anos, trechos esses representativos ao recapeamento de 40 mm que vem sendo executado pelas autoridades responsáveis na Malásia, local onde se desenvolveu a pesquisa.

Segundo os autores, a intensidade do trincamento (CI) foi definida de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Intensidade do Trincamento (CI) - (adaptado de Rolt *et al.* (1997))

Intensidade do Trincamento	Definição
0	Sem trincas
1	Uma única trinca
2	Mais de uma trinca - não conectadas
3	Mais de uma trinca - conectadas
4	Trincamento "Couro de Jacaré"

As deflexões foram obtidas através do equipamento FWD e padronizadas para uma temperatura de 35° C e uma pressão de 700 kPa. O volume de tráfego foi estimado a partir de contagens de tráfego relatadas pela *Highway Planning Unit*. No estudo, veículos médios e pesados foram classificados como veículos comerciais.

O modelo de previsão desenvolvido pode ser visualizado na equação (2.16).

$$P/(1-P) = e^{(a+b \times CV + c \times DEF)} \quad (2.16)$$

onde,

P = probabilidade de trincar (varia de 0 a 1);

CV = quantidade acumulada de veículos comerciais até o trincamento ($\times 10^3$);

DEF = deflexões obtidas com o FWD antes da nova camada (mm).

As constantes "a", "b" e "c" variam em função da intensidade do trincamento antes da nova camada (CI). Os valores correspondentes encontram-se discriminados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valor das Constantes "a", "b" e "c" em Função de CI

a	b	c	CI
-3,76	0,0008	2,07	1
-2,62	0,00066	1,36	2
-2,37	0,00095	1,19	3
-2,2	0,00111	1,25	4

Os valores das constantes não foram determinados para o $CI = 0$ uma vez que corresponde a uma condição sem trincas, sem possibilidade de reflexão.

As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam a aplicação do modelo para dois valores de deflexão, 0,5 mm e 1,0 mm, com crescente valor acumulado de tráfego e para os vários níveis de intensidade de trincamento (1, 2, 3 e 4), que são os níveis onde efetivamente existem trincas formadas e com possibilidade de reflexão.

Com base nos resultados, os autores concluem que existe uma diferença significativa entre pavimentos que apresentam trincas conectadas ($CI=3$ e 4) e pavimentos que apresentam trincas isoladas ($CI=1$ e 2). Apenas nas rodovias com baixo volume de tráfego de veículos comerciais, baixas deflexões e sem a presença de trincas conectadas os revestimentos delgados duram o suficiente para serem considerados economicamente viáveis.

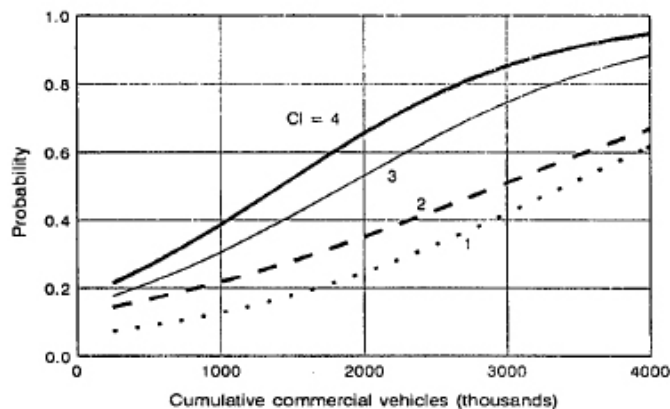


Figura 2.4 – Probabilidade de Reflexão de Trincas (DEF = 0,5 mm) - (Rolt et al., 1996)

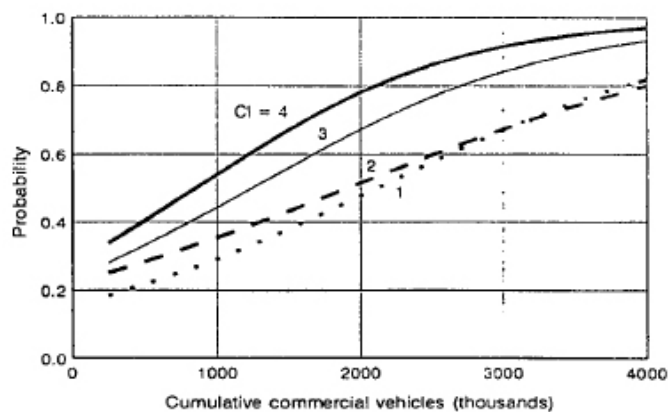


Figura 2.5 – Probabilidade de Reflexão de Trincas (DEF = 1,0 mm) - (Rolt et al., 1996)

Eltahan e Lytton (2000) apresentam um modelo empírico-mecânico de previsão de desempenho, baseado na mecânica da fratura, e utilizando dados obtidos através do Departamento de Transportes da Flórida (Florida Department of Transportation - FDOT). Os dados vieram de diversos bancos de dados, e suas informações reunidas para se chegar nas variáveis a serem utilizadas no modelo, sendo as mesmas referentes ao histórico de carregamentos de tráfego, espessuras de camadas de recapeamento, espessuras de camadas dos pavimentos originais, informações climáticas, características do trincamento antes do recapeamento e módulos estruturais (obtidos através de retroanálise).

Foram selecionados trinta segmentos a serem utilizados no desenvolvimento do modelo de propagação de trincas e mais outros 20 segmentos para o desenvolvimento do modelo que prevê o início do trincamento. Para o modelo de propagação do trincamento os segmentos foram divididos em dois tipos, interestaduais e arteriais.

Os modelos desenvolvidos para previsão da propagação de trincas e também para prever o início do trincamento podem ser observados nas equações (2.2) e (2.3), respectivamente, apresentadas a seguir.

$$c = c_r \left(e^{-\left(\frac{\rho N f}{N}\right)^\beta} \right) + (1 - c_r) \left(e^{-\left(\frac{\rho N f_0}{N}\right)^\beta} \right) \quad (2.17)$$

$$N f_0 = \rho N f_c \left(\frac{\beta}{\beta + 1} \right)^{\left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right)} \quad (2.18)$$

onde,

c = proporção total da área trincada da nova camada de pavimento;

N = número de ciclos de carga;

$N f_0$ = número de ciclos de carga onde o trincamento inicia;

c_r , $\rho N f_c$ e β = parâmetros do modelo.

O modelo exposto na equação (2.18) foi então ajustado para cada um dos segmentos disponíveis nos dados selecionados, obtendo um resultado satisfatório, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,97 para os dados dos segmentos classificados como interestaduais e 0,92 para os segmentos classificados como arteriais.

Os parâmetros foram então modelados em conjunto com os fatores que afetam a propagação do trincamento, fatores esses selecionados com base no conhecimento técnico de engenharia e também com o que se encontrava disponível no banco de dados do FDOT. O trincamento previsto foi então comparado com o trincamento observado obtendo-se coeficientes de determinação (R^2) de 0,72 para os dados dos segmentos classificados como interestaduais e 0,40 para os segmentos classificados como arteriais. No caso de previsão do início do trincamento, dos vinte segmentos utilizados no estudo, em apenas três deles o modelo não foi capaz de prever com uma certa exatidão o tempo em que a trinca apareceria.

As equações (2.19) a (2.24) apresentam os parâmetros em função dos fatores que afetam a propagação das trincas definidos e modelados conforme o citado anteriormente. Temos para o caso dos segmentos classificados como interestaduais os parâmetros referentes as equações (2.19) a (2.21) e, para os segmentos classificados como arteriais, as equações (2.22) a (2.24).

$$\rho Nf_c = \left(2381,27 - 10,4913 \left[\frac{E_0}{E_{SG}} (d_0 + d_1)^3 + \frac{E_b}{E_{SG}} d_b^3 \right]^{\frac{1}{2}} + 910,673 [d_0]^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad (2.19)$$

$$\beta = \left(\begin{array}{l} -45,7897 + 0,0077723 \left[\frac{E_0}{E_{SG}} (d_0 + d_1)^3 + \frac{E_b}{E_{SG}} d_b^3 \right]^{\frac{1}{2}} + 0,30353 (d_0)^{\frac{1}{2}} \\ + 158,824 \left[\frac{R}{H} \right]^{\frac{1}{2}} + 0,0075925 [E_{SG}]^{\frac{1}{2}} \end{array} \right) \quad (2.20)$$

$$c_r = \frac{1}{1 + e^{-201847 + 0,081782 \left[\frac{E_0}{E_{SG}} d_1^3 + \frac{E_b}{E_{SG}} d_b^3 \right]^{\frac{1}{2}} - 82,8103 \left[\frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{2}} + 0,094262 [E_{SG}]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.21)$$

$$\rho Nf_c = \left(776,287 - 0,23122 \left[\frac{E_0}{E_{SG}} (d_0 + d_1)^3 + \frac{E_b}{E_{SG}} d_b^3 \right]^{\frac{1}{2}} + 100,974 [d_0]^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad (2.22)$$

$$\beta = \left(\begin{array}{l} 4,69092 + 0,0050539 \left[\frac{E_0}{E_{SG}} (d_0 + d_1)^3 + \frac{E_b}{E_{SG}} d_b^3 \right]^{\frac{1}{2}} - 1,32925 (d_0)^{\frac{1}{2}} \\ - 6,84703 \left[\frac{R}{H} \right]^{\frac{1}{2}} + 0,0027877 [E_{SG}]^{\frac{1}{2}} \end{array} \right) \quad (2.23)$$

$$c_r = \frac{1}{1 + e^{-19,0875 + 0,003348 \left[\frac{E_0}{E_{SG}} d_1^3 + \frac{E_b}{E_{SG}} d_b^3 \right]^{\frac{1}{2}} + 108,436 \left[\frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{2}} + 0,013754 [E_{SG}]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.24)$$

onde,

E_0 = rigidez da superfície de concreto asfáltico;

E_b = rigidez da base;

E_{SG} = rigidez da sub-base;

d_0 = espessura da camada superior de concreto asfáltico (recapeamento);

d_1 = espessura da camada inferior de concreto asfáltico (antiga);

H = temperatura média anual;

R = taxa anual média de precipitações.

O programa HDM-III (*Highway Design and Maintenance Standards Model*), desenvolvido pelo Banco Mundial e utilizado na gerência de pavimento, apresenta equações para prever o início do aparecimento das primeiras trincas de reflexão na superfície do recapeamento asfáltico. Os modelos empíricos simplificados utilizados no programa são apresentados a seguir, nas equações (2.24) e (2.25).

$$TY_{cr2} = 10,8 \exp(-1,21D_0 - 1,02YE_4D_0) \quad (2.24)$$

$$TY_{cr2} = 2,54 \exp(0,0157H_R - 0,0141PCR_4) \quad (2.25)$$

onde,

TY_{cr2} = tempo em anos para o surgimento das primeiras trincas de reflexão na superfície;

D_0 = deflexão do pavimento, em mm;

YE_4 = número anual de repetições de eixo padrão de 80 kN;

H_R = espessura da camada de recapeamento, em cm;

PCR_4 = porcentagem de área do pavimento original com trincas classe 4 da AASHTO.

O HDM-III teve sua atualização desenvolvida pelo ISOHDM (*International Study of Highway Development and Management*), dando origem ao HDM-4 (*Highway Development and Management Tool*). A diferença entre as versões, por parte do HDM-4, é a consideração dos efeitos de congestionamento, a análise de pavimentos asfálticos em climas frios, inclusão de diversos tipos e estruturas de pavimentos, além disso, ainda se tem a consideração da segurança das rodovias e dos efeitos ambientais (Nascimento, 2005).

NCHRP (2004) apresenta modelo de previsão de desempenho empírico simplificado para o caso do trincamento por reflexão. Esse modelo vai prever a porcentagem de trincas que se propagarão através da nova camada em função do tempo. A equação utilizada é apresentada na seqüência.

$$RC = \frac{100}{1 + e^{a+bt}} \quad (2.26)$$

onde,

RC = porcentagem de trincas refletidas (%);

t = tempo (anos);

a, b = parâmetros do modelo;

h_{ac} = espessura de material asfáltico acima da camada trincada.

Os parâmetros do modelo "a" e "b" são funções da espessura de material asfáltico acima da camada trincada, o tipo do pavimento existente (se rígido ou flexível), bem como qualidade de transferência entre placas de concreto (pavimentos rígidos). A Tabela 2.4 apresenta os valores dos parâmetros "a" e "b".

Tabela 2.4 – Parâmetros do Modelo - (NCHRP, 2004)

Tipo de Pavimento	Parâmetros	
	a	b
Flexível	$3,5 + 0,75(h_{ac})$	$-0,688584 - 3,37302(h_{ac})^{-0,915469}$
Rígido (boa transferência de carga)	$3,5 + 0,75(h_{ac} - 1)$	$-0,688584 - 3,37302(h_{ac} - 1)^{-0,915469}$
Rígido (transferência de carga ruim)	$3,5 + 0,75(h_{ac} - 3)$	$-0,688584 - 3,37302(h_{ac} - 3)^{-0,915469}$

O modelo assume algumas condições básicas, o valor de h_{ac} mínimo a ser utilizado é de 2 polegadas (~5 cm) para o caso de pavimento flexível existente, 3 polegadas (~7,6 cm) para pavimento rígido com boa transferência de carga e 4 polegadas (~10 cm) para pavimento rígido com transferência de carga deficiente. Pode-se considerar a utilização de geossintéticos, para isso se considera uma equivalência entre geossintético e asfalto de 2 polegadas (~5 cm). Cabe salientar que esses valores são os informados em HCRP (2004).

Wu *et al.* (2006) citam que o fato do modelo ter sido desenvolvido tendo como base observações puramente empíricas, não se deve ao fato da reflexão de trincas ser pouco importante, o que acontece é que um modelo racional de performance, que avalie a performance de diferentes alternativas de projeto contra a reflexão de trincas, ainda não está disponível.

3. CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho fará uso de pista experimental construída na Área de Testes de Pavimentos do Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, e dará continuidade a estudos iniciados em 1999, buscando complementar e obter resultados mais significativos quanto ao emprego de geotêxteis em sistemas anti-reflexão de trincas.

Com base nos trabalhos realizados anteriormente será feita uma descrição da estrutura da pista, os materiais empregados na sua execução, bem como características dos geotêxteis utilizados no experimento.

3.2 ESTRUTURA DA PISTA

De acordo com Viera (2002) a pista foi construída sobre um pavimento já existente e estudado anteriormente por Núñez (1997), sendo que sobre o mesmo foi executada uma camada de concreto asfáltico de 4 cm, em seguida foram colocados os geotêxteis e por fim uma camada de recapeamento de concreto asfáltico com 5 cm de espessura. A estrutura final das camadas do pavimento ficou caracterizada conforme dados constantes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Estrutura do Pavimento

Camada	Material Empregado	Espessura (cm)
Camada final de terraplenagem	Argila vermelha de comportamento Laterítico	60
Sub-base	Macadame seco com basalto alterado	16
Base	Brita graduada de rocha sã	12
Tratamento Superficial	Tratamento superficial duplo com capa selante	2,5
Revestimento antigo	Concreto Asfáltico	4
Camada intermediária	Geotêxteis (G 150 e G 150-TF) impregnados com emulsão	-
Recapeamento	Concreto Asfáltico	5

As trincas produzidas artificialmente na camada inferior de concreto asfáltico, foram executadas com a finalidade de reproduzir um padrão de trincamento por fadiga. As trincas foram serradas, apresentando 3,5 mm de largura e 4 cm de profundidade, e dispostas

conforme esquematizado na Figura 3.1. A pista foi dividida em três trechos, sendo dois trechos de 2,5 m com geotêxteis e um trecho central de 2 m sem a camada intermediária.

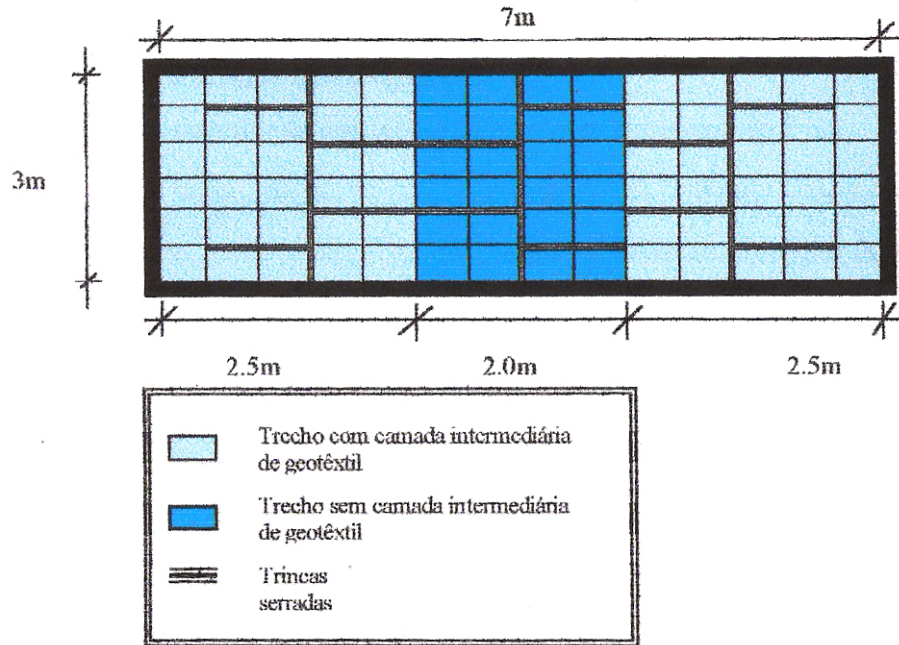


Figura 3.1 - Padrão de Trincamento (Viera, 2002)

A pista foi dividida em oito seções afastadas de 1 m e em duas faixas (A e B), com larguras de 0,70 e 1 m respectivamente, conforme Figura 3.2, sendo as seções S1 a S3 correspondentes a área com geotêxtil G 150, as seções S4 a S5 correspondentes a áreas sem geotêxtil e por fim as seções S6 a S8 correspondentes a área com geotêxtil G 150-TF.



Figura 3.2 - Seções da Pista Experimental (Viera, 2002)

3.2.1 Camada Final de Terraplenagem

De acordo com Núñez (1997) o material empregado na camada final de terraplenagem tratava-se de argila vermelha de comportamento laterítico. As propriedades do solo são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resumo das Propriedades do Solo

Propriedade do Solo	Índice
Densidade Real dos Grãos	2,85
Limite de Liquidez (%)	44
Índice de Plasticidade (%)	21
Classificação HBR	A-7-6(7)
Classificação MCT	LG'
Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³)	16,70
Teor de Umidade Ótimo (%)	20,60

3.2.2 Sub-base de Macadame Seco

De acordo com Núñez (1997) foi empregado basalto alterado na sub-base tipo macadame seco, sendo o material proveniente de Ibirubá (RS).

Inicialmente, no seu processo de beneficiamento, o basalto alterado passou por um primeiro britador e uma peneira, de onde foi selecionado o agregado graúdo, material retido na peneira 4".

O material passante foi então triturado novamente para se obter o agregado miúdo, com 100% do peso passando na peneira 3/4" e 1% passando na peneira 4". O restante do material foi então transformado em pó, para posteriormente ser misturado em proporções iguais com o agregado miúdo, dando origem ao material de enchimento utilizado no macadame seco. (Núñez, 1997).

3.2.3 Base de Brita Graduada

O material utilizado é resultante da britagem de basalto de pedra (rocha sã), apresentando um peso específico aparente máximo de 23,0 kN/m³, correspondendo, por sua vez, a um teor ótimo de umidade de 7,5%. Os valores foram obtidos através do ensaio de compactação na

energia do Proctor Modificado. O equivalente de areia foi de 63%. (Núñez, 1997). A Tabela 3.3 apresenta os resultados da análise granulométrica da brita graduada empregada.

Tabela 3.3 - Análise Granulométrica (Núñez, 1997)

Peneira	% acumulada que passa em peso
2"	100
1"	90
3/4"	75
# 4	39
# 30	14
# 200	7

3.2.4 Tratamento Superficial Duplo (TSD)

Sobre a camada de base foi empregado um TSD executado com brita grossa e fina, enquadrada nas faixas A e C da ESP-15/91 do DAER/RS, com taxas de aplicação iguais a 15,70 kg/m² e 7,60 kg/m². Na capa selante sobre o tratamento foi empregado agregado com 100% do peso passando na peneira 3/8" e com menos de 2% passando na peneira 200, com taxa de aplicação de 4,81 kg/m² (Núñez, 1997).

Tabela 3.4 - Propriedades das Britas (Núñez, 1997)

Propriedades	Brita Grossa	Brita Fina
Massa Específica Real (kg/dm ³)	2,926	2,932
Massa Específica Aparente Solta (kg/dm ³)	1,459	1,339
Tamanho Médio (mm)	9,3	3,6
Índice de Lamelaridade	25,4	38,4

3.2.5 Camadas de Concreto Asfáltico

De acordo com Viera (2002) foi adotada a faixa granulométrica "tipo B" do DAER/RS tendo em vista a distribuição granulométrica dos agregados disponíveis. Na Tabela 3.5 é apresentada a distribuição granulométrica da mistura dos agregados constituintes das duas camadas de concreto asfáltico.

Tabela 3.5 - Distribuição Granulométrica dos Materiais Pétreos do CBUQ (Viera, 2002)

Peneira	Mistura	Faixa B (DAER)	Faixa de Trabalho
3/4"	100	100	100
1/2"	89,5	80 - 100	83,5 - 95,5
3/8"	78,7	70 - 90	72,7 - 84,7
# 4	54,7	50 - 70	50 - 60,7
# 8	40,3	35 - 50	46,3 - 44,3
# 30	23,2	18 - 29	19,2 - 27,2
# 50	14,9	13 - 23	13 - 18,9
# 100	9,6	8 - 16	8 - 12,6
# 200	5,9	4 - 10	4 - 9

As densidades reais e aparentes dos agregados, que apresentaram absorção de 1,5%, são apresentadas na Tabela 3.6. Devido à elevada absorção foi utilizada apenas a densidade aparente da mistura.(Viera, 2002).

Tabela 3.6 - Densidade dos Materiais Pétreos (Viera, 2001)

Materiais	Densidade Real	Densidade Aparente
3/4" - # 10	2,85	2,73
Passando na Peneira # 10	2,78	-
Mistura	-	2,786

Foi obtida uma porcentagem ótima de asfalto, para um índice de vazios de 3,8% na camada de rolamento, de 6% de CAP 20, com tolerância de $\pm 0,3\%$. Foi adicionado 0,3% de Dope ao CAP 20 devido aos resultados apresentados no estudo da pedreira (Viera, 2002). Na Tabela 3.7 temos as características Marshall do traço.

Tabela 3.7 - Características Marshall do traço especificado (Viera, 2002)

Característica	Resultado	ESP 16/91 DAER
Massa Específica Aparente (kg/m ³)	2.430	-
Estabilidade de 60° C (kN)	13,44	8 (mínimo)
Índice de Vazios (%)	3,8	3 - 5
Fluência 60° C (10 ⁻² "	8,4	8 - 16
Teor de Asfalto (%)	77,5	75 - 82
RBV (%)	16,9	75 - 82
VAM (%)	16,9	15

Foram extraídos CP *in situ* para se verificar as características de projeto, cujos dados podem ser vistos na Tabela 3.8, bem como foram determinados os módulos de resiliência e resistência à tração em CP moldados em laboratório, sendo os valores médios obtidos

equivalentes a 3.710 MPa (desvio padrão de 366 MPa) e 1,17 MPa (desvio padrão de 0,08 MPa), respectivamente (Viera, 2002).

Tabela 3.8 - Características Marshall *in situ* (Viera, 2002)

Característica	Resultado <i>in situ</i>	ESP 16/91 DAER
Massa Específica Aparente (kg/m ³)	2.442	2.430
Estabilidade de 60° C (kN)	9,98	13,14
Índice de Vazios (%)	4,4	3,8
Fluência 60° C (10 ⁻² "	12,4	8,4
Teor de Asfalto (%)	6	6
RBV (%)	77,5	75 - 82
VAM (%)	16,9	15

Foram extraídos corpos de prova com as duas camadas de concreto asfáltico nos trechos contendo o geotêxtil como camada intermediária (G 150 e G 150-TF), sendo que em laboratório as camadas foram separadas, e obtidos os módulos de resiliência para cada camada separadamente (Viera, 2002). Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Módulo de Resiliência de Corpos de Prova *in situ* (Viera, 2002)

Camada	Módulo de Resiliência (MPa)
Inferior (com geotêxtil G 150)	2.200
Inferior (com geotêxtil G 150-TF)	2.430
Superior (com geotêxtil G 150)	2.620
Superior (com geotêxtil G 150-TF)	2.890

3.2.6 Características dos Geotêxteis

Viera (2002) descreve a característica dos dois tipos de geotêxteis empregados no experimento, G 150 e G 150-TF, ambos fabricados em polipropileno, 100% agulhados e não tecidos, pela empresa Ober S.A. Na Tabela 3.10 temos listadas as características dos geotêxteis empregados.

A diferença entre os geotêxteis está no processo de fabricação. No caso o G 150-TF é um geotêxtil não tecido do tipo termofixado, que devido a particularidades no processo de interligamento dos fios, apresenta uma diminuição da abertura dos poros, redução da espessura nominal e uma maior resistência a tração quando comparado aos demais geotêxteis.

Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos com Camada Intermediária de Geotêxtil Submetidos à

Tabela 3.10 - Propriedades dos Geotêxteis (Viera, 2002)

Propriedade	G 150	G 150-TF
Gramatura (g/m ²)	150	150
Espessura Nominal (mm)	1,5	1
Porosidade (%)	90	70
Retenção de Asfalto (l/m ²)	1,2	1,1
Resistência a Tração (kN/m)	8	9
Alongamento na Ruptura (%)	60	60
Resistência ao Puncionamento (kN)	1,9	2
Permeabilidade Normal (cm/s)	4x10 ⁻¹	2,7x10 ⁻¹
Permissividade (s ⁻¹)	2,7	2
Abertura de Filtração (mm)	150	60

A aplicação dos geotêxteis se deu de acordo com o recomendado pelo fabricante, sendo a seqüência de atividades listadas a seguir (Viera, 2002).

- a) Limpeza da pista;
- b) Selagem das trincas existentes;
- c) Correção de irregularidades com uma compactação adequada;
- d) Nova limpeza da pista;
- e) Pintura de ligação com emulsão asfáltica;
- f) Colocação dos geotêxteis;
- g) Compactação dos geotêxteis com rolo liso;
- h) Pintura de ligação com emulsão asfáltica;
- i) Execução da camada de recapeamento;
- j) Compactação com rolo liso e de pneus.

3.3 EXECUÇÃO DA PISTA

Segundo Viera (2002), a pista foi executada em duas etapas, inicialmente foi executada uma camada de 4 cm de CBUQ, camada essa artificialmente trincada, e em seguida uma segunda camada de 5 cm de CBUQ. As camadas de CBUQ foram executadas sobre um pavimento previamente existente e ensaiado.

Antes da construção da nova pista foi realizado um mapeamento das trincas existentes no pavimento, tendo em vista o mesmo já ter sido previamente ensaiado, seguido por uma regularização dessa camada Viera (2002).

A construção da nova pista se deu de acordo com as seguintes etapas (Viera, 2002):

- a) Camada de regularização sobre o pavimento previamente executado e ensaiado;
- b) Execução de pintura de ligação;
- c) Execução da camada de CBUQ de 4 cm;
- d) Execução das trincas artificiais na camada de CBUQ;
- e) Pintura de ligação sobre a camada trincada;
- f) Colocação dos Geotêxteis nos trechos nas seções previstas;
- g) Pintura de ligação sobre as mantas geotêxteis;
- h) Execução da camada de CBUQ de 5 cm.

A compactação da camada de CBUQ de 4 cm foi realizada com rolo de pneus e rolo liso, sendo o rolo liso molhado constantemente para evitar que o ligante aderisse durante o processo. As trincas artificiais foram previamente demarcadas na superfície da camada e serradas. A pintura de ligação foi realizada utilizando emulsão tipo RR 2C com emulex, composta de 70% água e 30% de emulsão, a temperatura de 45° C.

Os geotêxteis foram colocados e compactados com rolo de pneus. A camada de CBUQ de 5 cm teve o mesmo processo de compactação que a camada de 4 cm. Após a execução de cada uma das camadas foi realizado levantamento defletométrico com a viga Benkelman.

4. SIMULADOR DE TRÁFEGO UFRGS/DAER

O trecho em estudo foi solicitado por equipamento simulador de tráfego, de modo a se conseguir, em um curto espaço de tempo, a degradação que o pavimento apresentaria em um longo período quando em condições reais de uso. O Simulador de Tráfego, observado na Figura 4.1, construído entre 1992 e 1994 pelo DAER, com projeto realizado pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, está localizado no Campus do Vale, na Área de Pesquisa e Testes de Pavimento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Porto Alegre. Foi inspirado no equipamento de origem australiana, denominado *Accelerated Loading Facility*, e utilizado pela primeira vez no ano de 1996.



Figura 4.1 – Simulador de tráfego UFRGS/DAER

O simulador tem aproximadamente 15 metros de comprimento, 2,5 metros de largura e 4,3 metros de altura, com uma peso na faixa de 220 kN e possui as seguintes características:

- Curso de Atuação da Carga sobre o Pavimento = 8 metros;
- Curso de Aceleração e Desaceleração = 3 metros;
- Carga Sobre o Pavimento = 0 a 65 kN;
- Princípio Hidráulico de Aplicação de Carga;
- Aplicação de Carga = Linear, Único Sentido, Não Tracionada;

- Sistema de Rodado = Simples ou Duplo, Articulado, Regulável;
- Velocidade de Deslocamento = média de 5 km/h;
- Acionamento Geral Elétrico.

Está equipado com pneus com lonas, tamanho 9 x 20 cm em um semi-eixo simples com rodas duplas, com cargas de eixos variando entre 82 kN e 130 kN. Foram estabelecidas relações entre a carga de eixo e a pressão nos pneus obtendo valores que variam de 0,53 MPa (82 kN) a 0,73 MPa (130 kN). Abaixo são apresentados resumidamente detalhes técnicos e de funcionamento do simulador, uma descrição detalhada é apresentada em Núñez (1997):

- Sistema de Guiamento do Rodado: o rodado pode ser simples ou duplo e está ligado a um carro, que tem seu deslocamento realizado sobre trilhos, tracionado por um cabo de aço. Este carro possui cinco rodas em cada lateral, as rodas promovem seu guiamento, sendo que três delas servem ao guiamento sob carga e duas delas servem ao guiamento no retorno para reposicionamento, durante um ciclo de aplicação.
- Sistema de Aplicação de Carga: a aplicação da carga é feita através de uma unidade hidráulica comandada eletricamente e de um cilindro hidráulico, ambos montados sobre o carro. A carga é aplicada sempre com deslocamento em um único sentido, sendo o retorno realizado com o carro em suspensão, isso é feito para que se consiga reproduzir as condições de tráfego reais em uma rodovia.

O equipamento possibilita aplicação de ciclos de carga em espaçamentos de tempo entre 16 e 18 segundos, o que corresponde a uma variação entre 200 e 225 ciclos por hora respectivamente.

Núñez (1997) relata que quando se aplicam cargas de eixo superiores a padrão, no caso 82 kN, se consegue acelerar a degradação dos pavimentos experimentais. Segue relatando que, de acordo com o US Corps of Engineers, a aplicação de cargas de eixo de 100 kN e 130 kN são equivalentes a 3,5 e 17,6 vezes, respectivamente, a aplicação da carga de eixo padrão.

Núñez (1997) também apresenta uma tabela onde se observa os tempos que o simulador leva para reproduzir a degradação que um pavimento com volume médio de tráfego (10^6 ciclos de carga do eixo padrão) experimenta ao longo da sua vida de projeto. Nessa tabela, reproduzida na Tabela 4.1, é possível verificar os efeitos que a aplicação de uma carga de eixo superior a padrão causa no tempo da degradação, ou seja, se consegue visualizar a redução no tempo.

Tabela 4.1 – Tempo de Operação para Aplicação de 10^6 Cargas de Eixo Padrão

Tempo para aplicação de 10^6 ciclos de carga	Carga de eixo aplicada pelo simulador (kN)		
	82	100	130
Horas	4444	1259	253
Dias	400	113	23

- Sistema de Amortecimento: composto por molas helicoidais, colocadas nas extremidades dos trilhos de guiamento, tendo como função parar o carro com segurança caso ocorra alguma falha no sistema de controle.
- Sistema de Acionamento: o acionamento se dá por meio de um motor de indução trifásico de rotor bobinado, para regime intermitente, com freio eletromagnético, com potência de 15 CV e redutor. O motor vai acionar o tambor onde está o cabo de aço, mantido sempre tracionado através de mecanismo esticador em uma das extremidades, responsável por movimentar o carro.
- Sistema do Rodado: o rodado é ligado ao carro através de um garfo articulado, que possui em sua extremidade um semi-eixo de caminhão regulável, para permitir o alinhamento do rodado, onde então é fixado.
- Estrutura de Suporte Geral: a estrutura é composta por painéis Bailey tipo BB.1 sobrepostos, servindo de reação as cargas e apoiada sobre duas vigas-caixão localizadas nas extremidades.
- Sistema de Controle: o equipamento é comandado através de um quadro de comando elétrico, tendo os sistemas acionados através de um microprocessador acoplado. O controle da velocidade de acionamento é feita através de um quadro de resistores.

- Sistema de Aceleração de Desaceleração: a aceleração e desaceleração são controladas pelo sistema de controle, através do acionamento do freio e do motor elétrico, e segundo um sinal elétrico originário de sensores óticos dispostos ao longo dos trilhos de guiamento do carro.
- Sistema de Deslocamento Transversal: o deslocamento transversal é coordenado com o longitudinal, dessa forma se consegue impedir a formação das trilhas de passagem de roda em um único local. Frações deste deslocamento vão ocorrer quando o rodado retornar suspenso no início de cada ciclo. Este movimento é realizado pelo deslocamento de toda a estrutura sobre um elemento guia existente em cada uma das viga-caixão de apoio externas ao equipamento. O movimento transversal pode ser programado com diversas larguras.

4.1 CALIBRAÇÃO DA UNIDADE HIDRÁULICA

Antes de se iniciar a solicitação da pista se realizou a calibração da unidade hidráulica do simulador, no processo foram utilizados uma unidade de leitura digital e uma célula de carga, apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 respectivamente.



Figura 4.2 – Unidade de leitura digital



Figura 4.3 – Célula de carga

O processo de calibração consiste na aplicação, pelo rodado, de ciclos de carga e descarga sobre a célula de carga que, por sua vez, está posicionada entre duas placas metálicas, sendo que a placa inferior encontra-se diretamente sobre o subleito do pavimento. Na Figura 4.4 pode-se observar detalhes do posicionamento das placas metálicas e da célula de carga.



Figura 4.4 – Posicionamento das placas metálicas e da célula de carga

O processo de calibração dá origem a uma curva de calibração, que relaciona a carga aplicada pelo semi-eixo ao pavimento com a pressão correspondente regulada na unidade hidráulica. Na Figura 4.5 temos a curva de calibração obtida no processo, bem como sua expressão matemática (4.1). A curva apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,95.

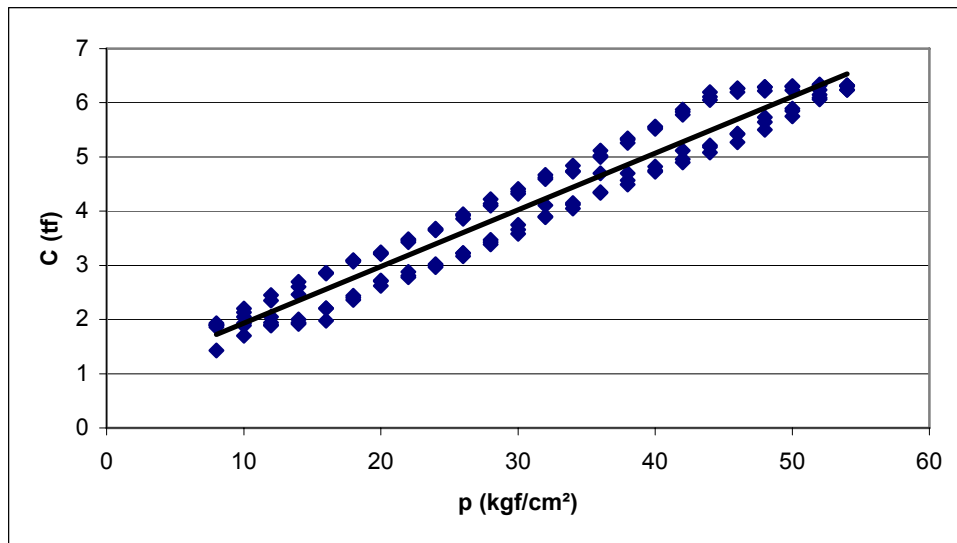


Figura 4.5 – Curva de calibração da unidade hidráulica

$$C = 0,8877 + 0,1046p \quad (4.1)$$

onde,

C = Carga aplicada pelo semi-eixo à superfície do pavimento (tf);

p = Pressão correspondente na unidade hidráulica (kgf/cm²).

Na Tabela 4.2 temos as relações entre a carga de semi-eixo e a pressão na unidade hidráulica para os níveis de carga aplicados durante a solicitação da pista.

Tabela 4.2 – Relações entre carga de semi-eixo e pressão na unidade hidráulica

C (tf)	p (kgf/cm ²)
4,1	31
5	40

Durante a solicitação da pista, no mês de Dezembro de 2008, o simulador passou por manutenção por problemas relacionados com a unidade hidráulica, tendo inclusive componentes substituídos. Devido a esse fato se fez necessária nova calibração antes de reiniciar a simulação, o que por sua vez gerou nova curva de calibração, que é apresentada na Figura 4.6, seguida de sua expressão matemática (4.2).

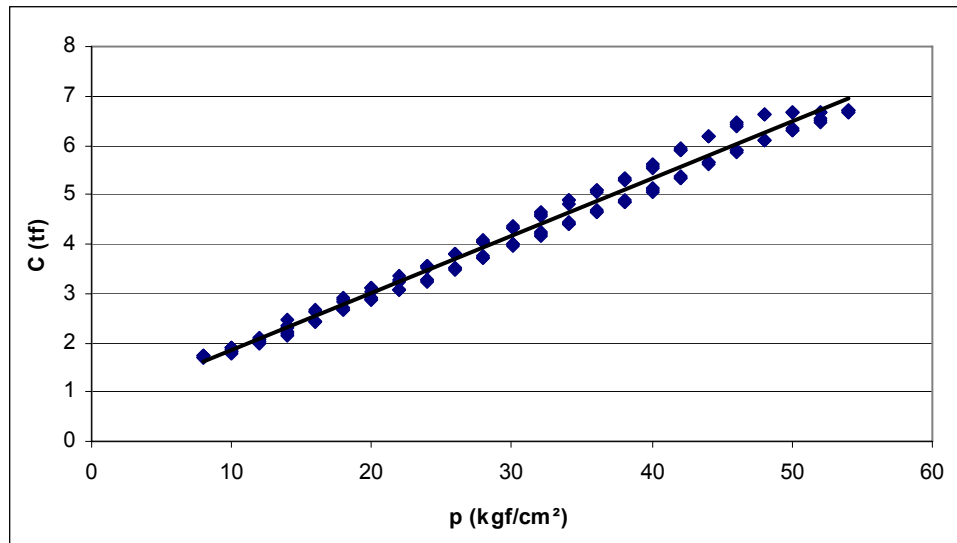


Figura 4.6 – Curva de calibração da unidade hidráulica

$$C = 0,8877 + 0,1046p \quad (4.2)$$

onde,

C = Carga aplicada pelo semi-eixo à superfície do pavimento (tf);

p = Pressão correspondente na unidade hidráulica (kgf/cm²).

A curva apresentou coeficiente de determinação R^2 de 0,98. Na Tabela 4.3 temos as relações entre a carga de semi-eixo e a pressão na unidade hidráulica para os diferentes níveis de carga aplicados.

Tabela 4.3 – Relações entre carga de semi-eixo e pressão na unidade hidráulica

C (tf)	p (kgf/cm²)
4,1	30
5	38
6	46

5. METODOLOGIA

Para realização do trabalho, inicialmente se realizou a coleta e organização dos dados referentes ao monitoramento previamente realizado no trecho em estudo e, com base nesses dados, se deu continuidade no acompanhamento da evolução da degradação. O monitoramento realizado juntamente com os dados existentes, permitiram a análise do comportamento estrutural e funcional do pavimento.

Os parâmetros em análise estão divididos em três categorias listadas abaixo:

- Parâmetros de resposta estrutural: deflexões e bacias defletométricas;
- Parâmetros de comportamento: deformações permanentes e trincamento;
- Parâmetros ambientais: temperatura do ar e precipitações.

Com a extração de corpos de prova da pista experimental foram realizados, em laboratório, os seguintes ensaios de modo a se caracterizar as misturas previamente executadas no trecho em estudo:

- Módulo de Resiliência;
- Resistência a Tração;

Foram também aplicados modelos de previsão de desempenho para o caso específico de reflexão de trincas. A aplicação de modelos de previsão de desempenho teve como objetivo buscar uma análise comparativa entre a situação real e o previsto pelo modelo, tornando possível à verificação da representatividade do mesmo na situação em estudo.

Cabe salientar que o monitoramento, os ensaios e a aplicação dos modelos de previsão de desempenho foram realizados na faixa B da pista. Isto ocorreu pois a faixa A encontra-se desativada, sendo possível obter detalhes maiores em Vieira (2002).

5.1 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL

A resposta estrutural do pavimento foi acompanhada semanalmente, através de medições das deflexões, realizadas com a viga eletrônica. Essas medições foram realizadas nas seções S2 a S6 do pavimento, com o rodado do simulador de tráfego empregando nível de carga relativo a 100 kN.

A viga eletrônica tem princípio de medida semelhante à viga Benkelman e, para realização das medidas, posiciona-se a ponta de prova do equipamento, onde está o medidor LVDT responsável pela medição dos deslocamentos, entre os pneus do rodado do simulador, bem no eixo do mesmo.

O rodado então é colocado em movimento e as leituras das deflexões nos diferentes pontos de teste são realizadas automaticamente pelo equipamento. Em cada uma das seções são obtidas três leituras, bem como a temperatura do pavimento em cada leitura.

5.2 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO

Foram avaliados o trincamento, através do mapeamento das trincas, e as deformações permanentes, com o uso do perfilógrafo.

5.2.1 Evolução do Trincamento

O surgimento de trincas no recapeamento foram acompanhados por inspeção visual, em intervalos de aproximadamente 30.000 ciclos de carga.

O mapeamento das trincas foi realizado através de pintura das mesmas com tinta, e posterior transferência para papel milimetrado com o auxílio de uma grade metálica de 1,0 x 1,0 m, subdividida em quadrados de 10 cm. Foi medido também o comprimento de cada trinca, de modo a se graficar e analisar o desenvolvimento do trincamento.

5.2.2 Deformações Permanentes

Os levantamentos foram realizados semanalmente, nas seções S2 a S7 do pavimento. O equipamento utilizado denomina-se transverso-perfilógrafo e seu funcionamento é bem simples, consistindo basicamente na comparação dos perfis transversais obtidos para os diferentes números de ciclos ensaiados e o perfil transversal obtido antes da pista ser colocada em carga pelo simulador.

A medida é registrada em papel milimetrado, através do desenho do perfil transversal, cuja escala se apresenta em verdadeira grandeza na direção vertical, e em escala de 1:20 ou 1:10 na direção horizontal.

5.3 PARÂMETROS AMBIENTAIS

Os registros da temperatura do ar e também das precipitações foram obtidos através de dados disponibilizados pelo CPTEC/INPE.

As medidas das temperaturas do interior do pavimento foram realizadas com o auxílio de um termômetro digital de precisão. As temperaturas foram medidas nas profundidades de 5 e 9 cm, o que permitiu verificar a temperatura na interface entre o recapeamento e o pavimento antigo, bem como posteriormente corrigir o valor das deflexões.

5.4 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

Com os dados da evolução do trincamento, obtidos através da solicitação do pavimento pelo equipamento simulador de tráfego, se teve base para verificar a efetividade de modelos de previsão de desempenho para reflexão de trincas levantados da bibliografia, quando aplicados para as características da pista em estudo.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 HISTÓRICO DO CARREGAMENTO

A pesquisa na pista em estudo teve início com Viera (2001), sendo posteriormente continuada e novos resultados foram então apresentados em Núñez *et al.* (2008). Na primeira fase do estudo, compreendida entre os meses de Maio de 2000 e Março de 2001, foram aplicados 345.850 ciclos de carga de eixo de 100 kN, na segunda fase, compreendida entre os meses de Julho de 2005 e Dezembro de 2006, foram aplicadas mais 636.660 ciclos de carga de eixo de 100 kN, complementados com a terceira fase do estudo, objeto do presente trabalho, onde foram aplicados um total de 121.685 ciclos de carga de 100 kN entre os meses de Agosto de 2008 e Fevereiro de 2009. A solicitação total na pista totalizou 1.103.885 ciclos de carga de eixo de 100 kN.

Os valores acima são referentes a faixa B, a Tabela 6.1 apresenta o resumo dos ciclos de carga de 100 kN aplicados nas três fases do estudo, lembrando que entre Abril de 2001 e Junho de 2005 a pista não foi solicitada.

Tabela 6.1 – Ciclos de Carga nos Períodos de Estudo

Período de Aplicação	Ciclos de Carga (N)
Maio de 2000 a Março de 2001	345.540
Julho de 2005 a Dezembro de 2006	636.660
Agosto de 2008 a Fevereiro de 2009	121.685
Total	1.103.885

6.2 PARÂMETROS AMBIENTAIS

A pesquisa da qual trata a presente dissertação se desenvolveu entre os meses de Agosto de 2008 e Fevereiro de 2009, porém nos meses de Setembro de 2008 e Dezembro de 2008 o simulador ficou fora de operação devido à manutenção, por um período de aproximadamente duas semanas em cada um dos meses.

Na Figura 6.1 temos os registros de precipitações pluviométricas acumuladas no período de estudo, cujos dados foram obtidos através do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), que está vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Isto se fez necessário tendo em vista a dificuldade em se obter os dados da estação meteorológica do IPH. O gráfico mostra que o período de ensaio foi bastante chuvoso.

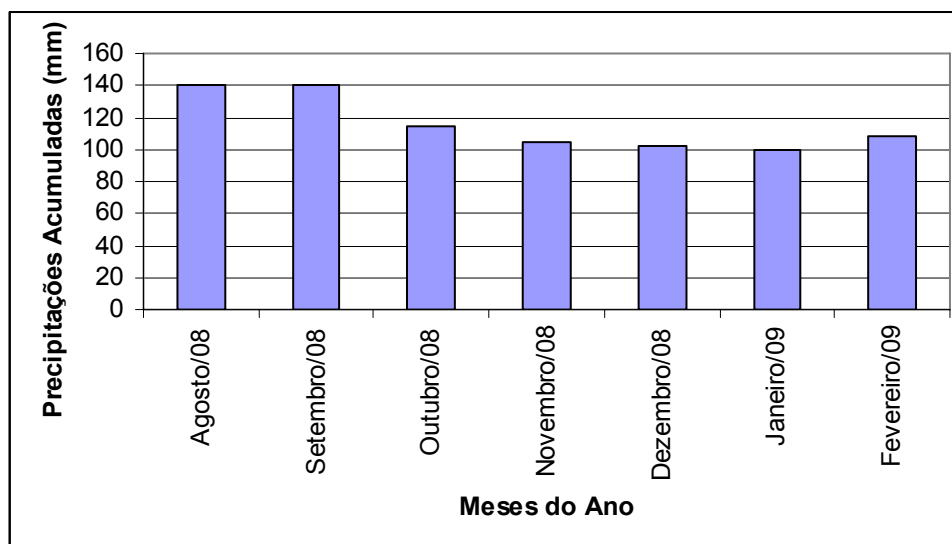


Figura 6.1 – Precipitações pluviométricas acumuladas

As variações diárias de temperatura também foram monitoradas no período da pesquisa, os dados também são provenientes do CPTEC, porém as informações referentes aos meses de Setembro de 2008 e Janeiro de 2009 não estavam disponíveis, além de estarem incompletos os dados referentes ao mês de Agosto de 2008.

No caso do mês de Setembro, a falta de dados não inviabiliza a análise, pois o simulador de tráfego se manteve em manutenção durante todo o período praticamente, o que já não ocorre nos meses de Agosto e Janeiro, onde os dados de temperatura eram de grande importância.

Na Figura 6.2 temos as variações de temperatura diárias correspondentes ao período de realização do experimento, que se deu entre 25/08/2008 e 05/02/2009. Analisando o gráfico observa-se que a pesquisa ocorreu em um período de temperaturas altas

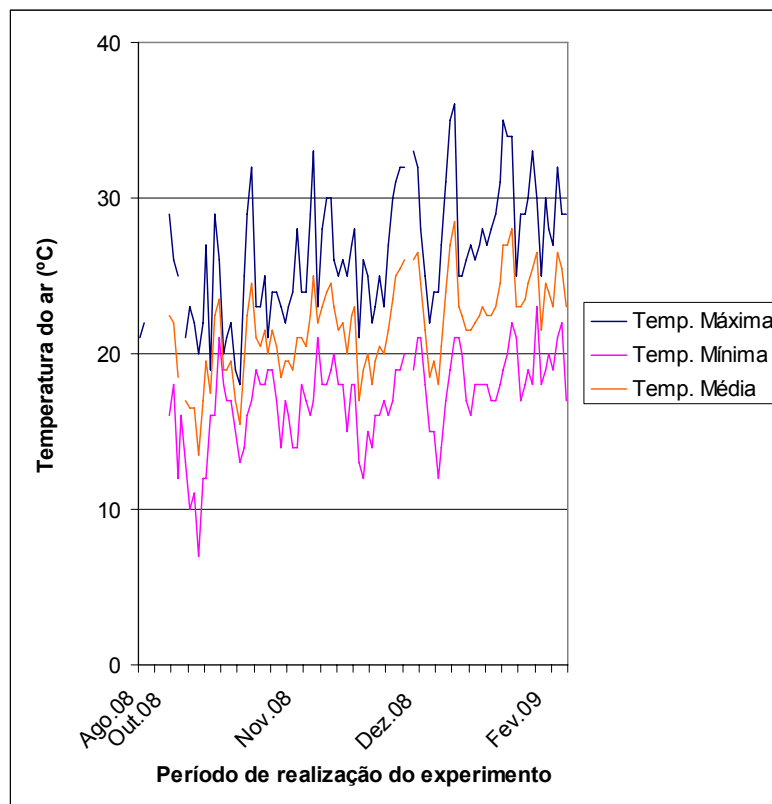


Figura 6.2 – Variação das temperaturas do ar

6.3 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO

6.3.1 Evolução do Trincamento

Não ocorreu aparecimento de trincas na primeira fase do estudo, ou seja, até a aplicação de 345.580 ciclos de carga pelo simulador de tráfego. A primeira trinca surgiu com 435.015 ciclos de carga e, como esperado, na zona do pavimento onde não se empregou geotêxteis como camada intermediária. Essa zona sem geotêxtil, ao final de 982.200 ciclos, segunda fase do estudo, apresentava comprimento de trinca igual a 413 cm e aos 1.103.885 ciclos aplicados, apresentava comprimento de trinca igual a 764 cm.

O início do trincamento nas zonas com geotêxteis não pode ser acompanhado visto que ocorreu no período em que a pista não estava sendo monitorada. Embora não se tenha essa informação, continuou-se o monitoramento para verificar como o trincamento continuaria a se desenvolver, o que totalizou ao fim do estudo um comprimento de 328 cm na zona com G 150 e 554 cm na zona com G 150-TF.

A Figura 6.3 apresenta a evolução do comprimento das trincas em função dos ciclos de carga aplicados, sendo que no período compreendido entre 611.682 e 911.213 ciclos não houve monitoramento, por isso a lacuna no gráfico. Nas Figuras 6.4 e 6.5 pode-se observar a evolução da densidade das trincas em função dos ciclos de carga aplicados.

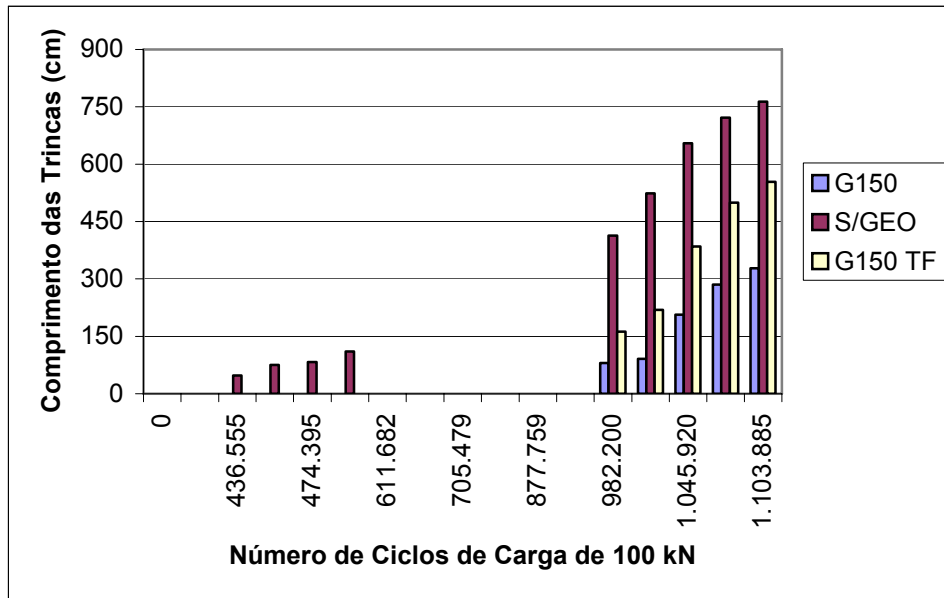


Figura 6.3 – Evolução do Trincamento

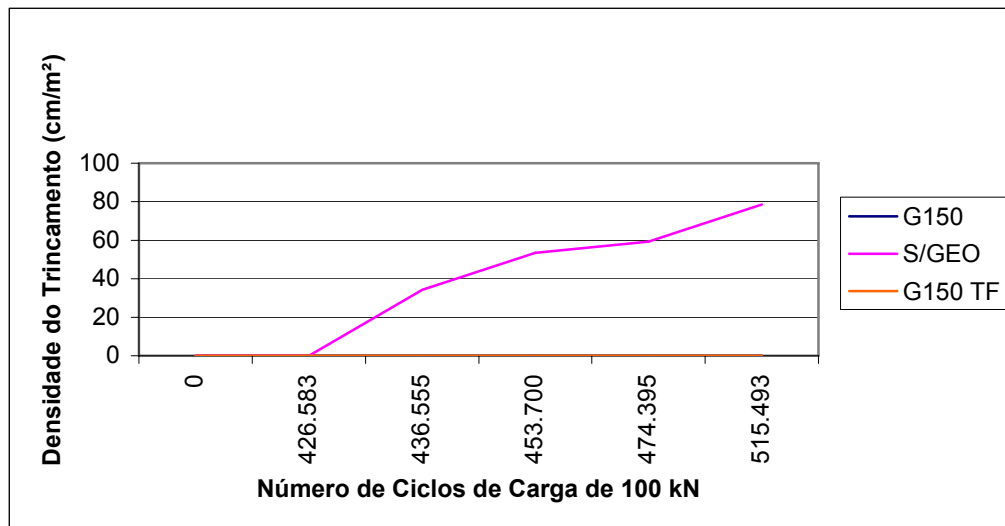


Figura 6.4 – Densidade do Trincamento entre 0 e 515.493 ciclos de carga

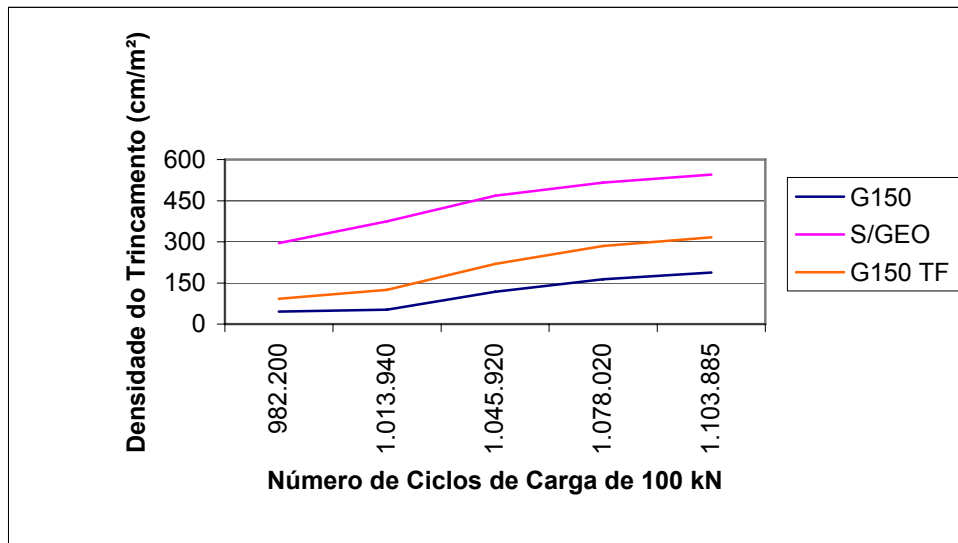


Figura 6.5 – Densidade do Trincamento entre 982.200 e 1.103.885 ciclos de carga

Analisando os gráficos, percebe-se que o trincamento foi maior na região sem geotêxteis, sendo aproximadamente 40% superior em relação a região com geotêxtil G150 e 15% em relação a região com geotêxtil G150 TF. Os geotêxteis também não obtiveram desempenhos idênticos, embora ambos tenham sido superiores a região sem geotêxtil, o tipo G150 mostrou melhores resultados do que o tipo G150 TF. Essa tendência de desempenho já vinha sendo observada na segunda fase do estudo realizada por Núñez *et al.* (2008).

As Figuras 6.6 a 6.10 permitem uma melhor visualização da evolução do trincamento em função do número de ciclos de carga.

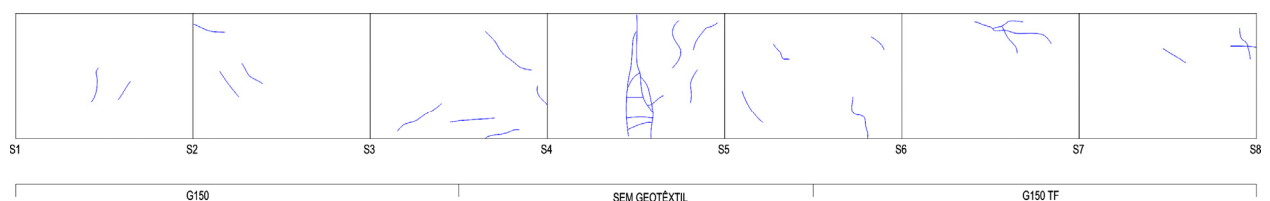


Figura 6.6 – Evolução do trincamento N = 982.200

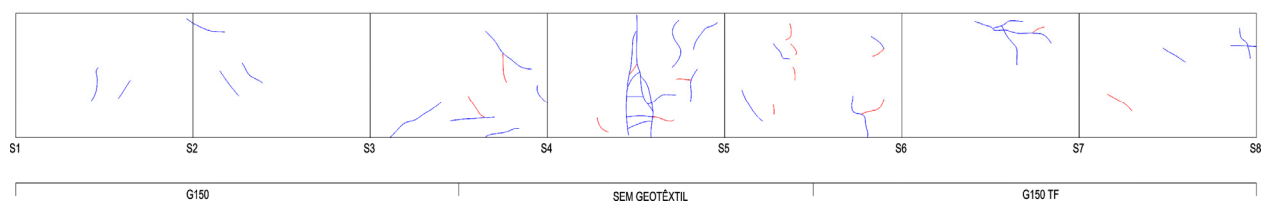


Figura 6.7 – Evolução do trincamento N = 1.013.940

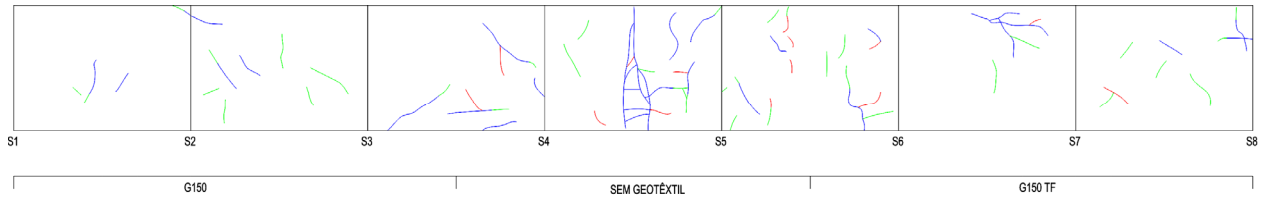


Figura 6.8 – Evolução do trincamento $N = 1.045.920$

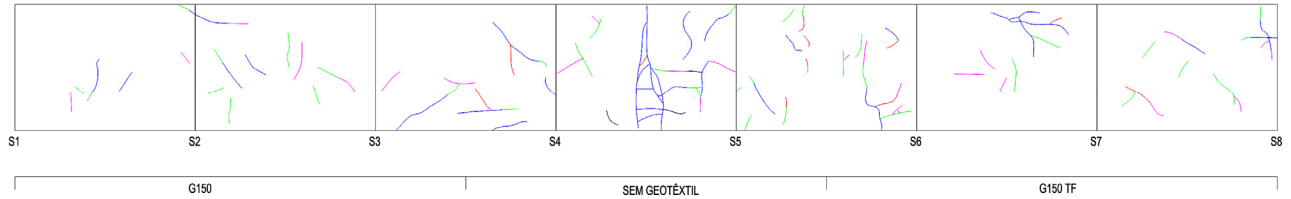


Figura 6.9 – Evolução do trincamento $N = 1.078.020$

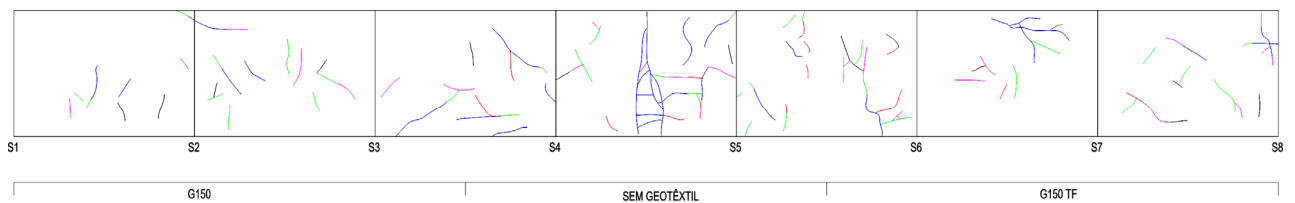


Figura 6.10 – Evolução do trincamento $N = 1.103.885$

6.3.2 Modelagem dos Dados Experimentais

De modo a se estimar a evolução do trincamento, bem como o início do trincamento nas regiões com geotêxtil, procurou-se ajustar curvas aos gráficos com os dados observados em campo. Para tal se fez uso do *Software Origin 8* da empresa *OriginLab*, o qual permite uma série de análises matemáticas e estatísticas.

Observado os gráficos da evolução do trincamento, verifica-se uma tendência de crescimento muito próximo a uma curva sigmoidal. Dentre as diversas opções de curvas para ajuste apresentadas pelo programa *Origin 8*, a que obteve uma melhor aproximação com os dados originais foi a curva de *Gompertz*, cuja equação de ajuste pode ser observada na seqüência.

$$DT = ae^{-e^{-k(N-x_c)}} \quad (6.1)$$

onde,

DT = Densidade do trincamento (cm/m²);

N = Número de ciclos de carga de 100 kN;

a, k, x_c = Constantes de ajuste;

e = Número de *Euler*.

Na Tabela 6.2 temos especificados os valores das constantes para cada uma das regiões da pista e, nas Figuras 6.11 a 6.13, podemos observar os gráficos comparativos entre as curvas de ajuste e os dados obtidos em campo.

Tabela 6.2 - Constantes de Ajuste do Modelo

Regiões	Constantes			R ²
	a	x _c	k	
G150	343	1.06E+06	1.13E-05	0.9879
S/GEO	1.64E+09	1.18E+07	2.53E-07	0.9801
G150TF	490	1.03E+06	1.20E-05	0.9950

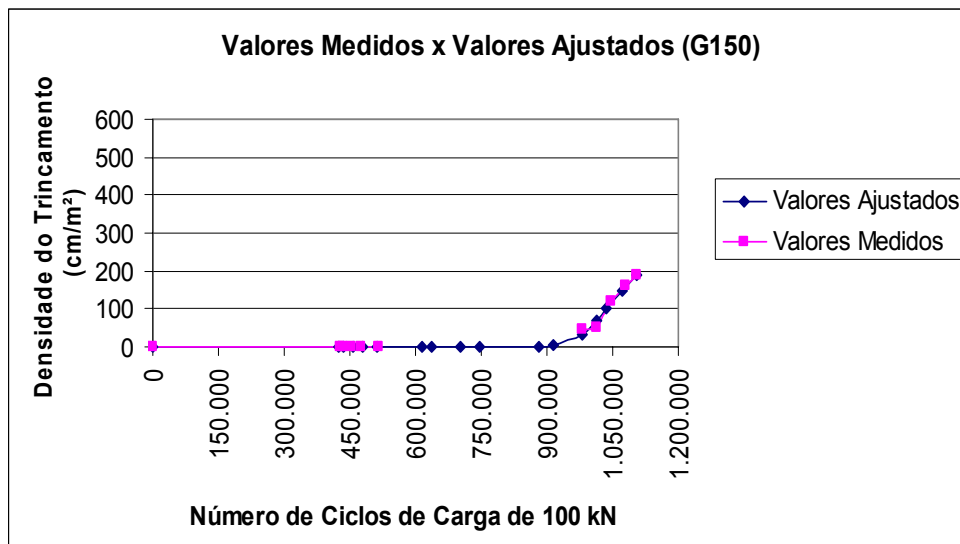


Figura 6.11 – Curva de ajuste da evolução do trincamento (G150)

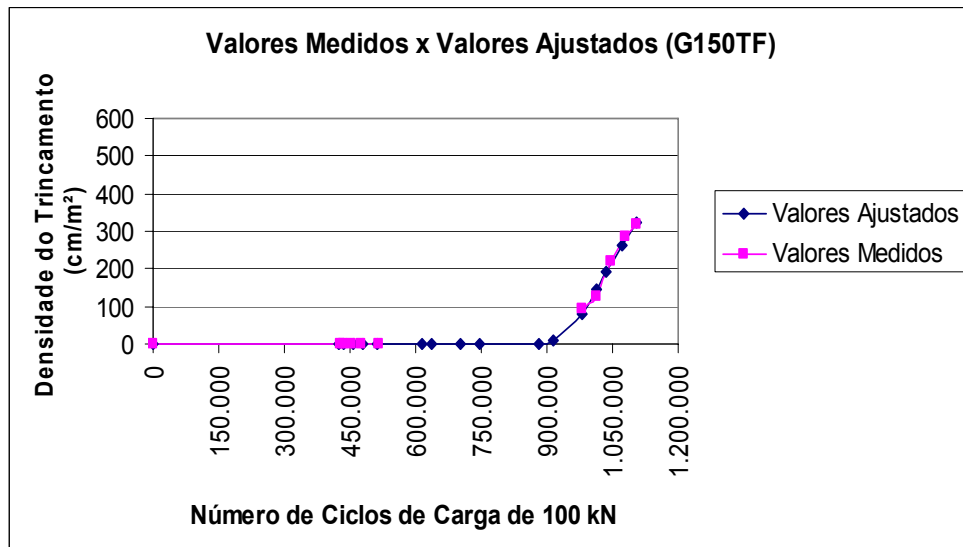


Figura 6.12 – Curva de ajuste da evolução do trincamento (G150 TF)

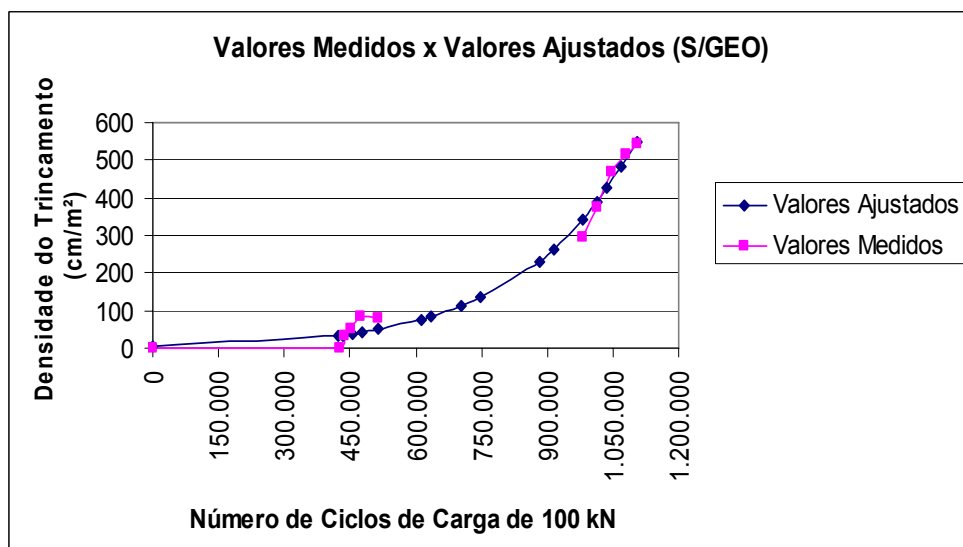


Figura 6.13 – Curva de ajuste da evolução do trincamento (Região sem Geotêxtil)

Percebe-se que, nas regiões com os geotêxteis G150 e G150 TF, a curva de ajuste se aproximou bastante dos dados de campo, isso já não foi observado na região sem geotêxtil nas proximidades dos 450.000 ciclos de carga, onde se observa uma pequena variação entre os valores. Esse fato por sua vez não inviabiliza o uso dos modelos, visto que ambos obtiveram coeficientes de determinação R^2 acima de 98%.

Os gráficos dão a indicação de que nas regiões com os geotêxteis, o início do trincamento se deu por volta de 900.000 ciclos de carga, o que ocorreu por sua vez no período em que não foram encontrados os dados de monitoramento. Na região sem geotêxtil o modelo apresenta divergências com os dados de campo no que diz respeito ao início do trincamento, que se deu com aproximadamente 426.000 ciclos de carga, porém após esse segmento observa-se que o mesmo apresenta a tendência observada em campo.

6.3.3 Análise do Trincamento

Foram extraídos corpos de prova da pista experimental de modo a se analisar a origem das trincas que surgiram através da solicitação do pavimento. Na Figura 6.14 se observa a localização de cada um dos 18 corpos de prova.

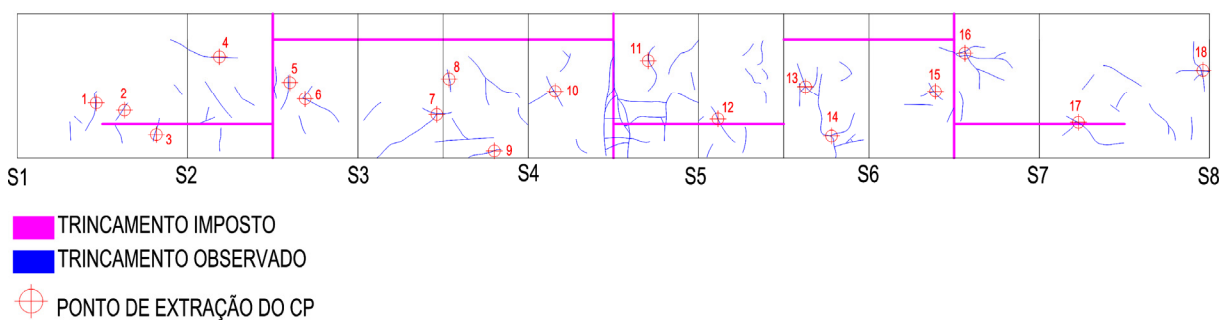


Figura 6.14 – Localização dos corpos de prova extraídos

A localização de cada um dos corpos de prova foi definida tendo como base o seu aparecimento e crescimento no decorrer da aplicação dos ciclos de carga. Os corpos de prova foram extraídos de todas as regiões da pista buscando se obter assim uma melhor visualização da origem do trincamento.

Não foi possível extrair corpos de prova de todas as trincas existentes visto sua proximidade face às dimensões da sonda rotativa, o que prejudicaria a qualidade do material extraído, bem como sua posterior análise.

Buscou-se também extrair amostras de trincas que, com base no trincamento imposto, pudessem caracterizar trincamento por reflexão. Este tipo de trincamento, de acordo com o

observado na Figura 6.15, não se mostra como o principal gerador de trincas na superfície do pavimento.

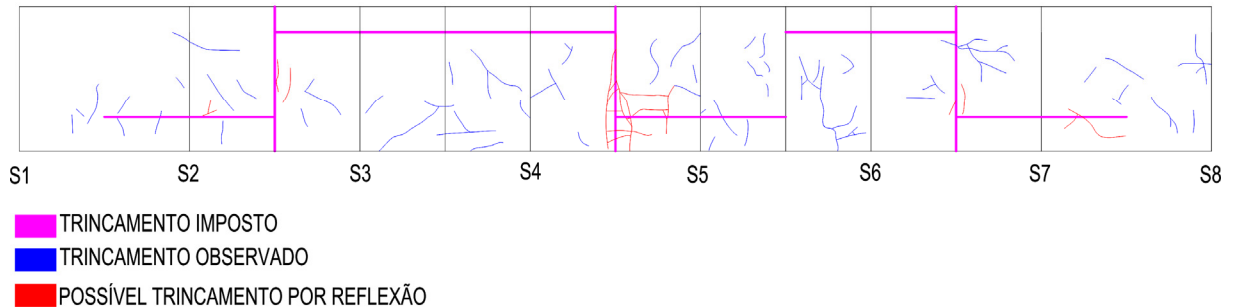


Figura 6.15 – Trincamento por reflexão na pista experimental

A análise visual dos corpos de prova mostrou o aparecimento de trincamento do tipo *top down cracking*, neste caso específico as trincas se iniciam a partir da superfície do revestimento.

Segundo a literatura, os mecanismos envolvidos neste tipo de trincamento não são totalmente conhecidos, porém fatores como variações de temperatura, idade do pavimento e tráfego tem uma parcela significativa na sua formação.

Tendo em vista os quase 10 anos de construção da pista experimental e as grandes variações de temperatura em que a mesma foi submetida, o aparecimento deste tipo de trincamento se torna possível.

Na Figura 6.16 se observa o trincamento do tipo *top down cracking* encontrado em CP extraído da pista.



Figura 6.16 – Trincamento do tipo *top down cracking*

Foi observado no CP de número 5, localizado na região com geotêxtil G150, um desvio na trajetória da trinca. A trinca relativa a esse CP está em uma posição compatível com trincamento por reflexão.

Esta condição específica é característica de trincamento por reflexão quando se faz uso de geotêxteis na camada intermediária entre o pavimento antigo deteriorado e camada nova de recapeamento.

O formato cilíndrico dos corpos de prova não permitiu uma perfeita visualização do trincamento por reflexão, dificultando inclusive sua representação fotográfica. Apesar da dificuldade encontrada, na Figura 6.17 observa-se o desvio na trajetória da trinca.

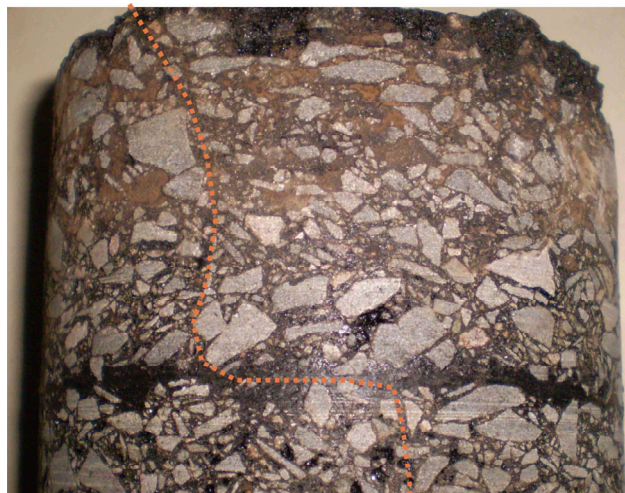


Figura 6.17 – Desvio na trajetória da trinca

Os demais corpos de prova extraídos apresentaram trincamento iniciando na base do recapeamento, este é o comportamento usualmente observado, podendo ter causas diversas já explicitadas no capítulo referente à revisão bibliográfica. Na Figura 6.18 é possível observar a trajetória desse tipo de trincamento.



Figura 6.18 – Trincamento iniciando na base do recapeamento

6.3.4 Deformações Permanentes

O acompanhamento da evolução das deformações permanentes na pista se deu através de medições, com o uso do transverso-perfilógrafo, nas seções S2 a S7. Foram desconsideradas da análise as seções S1 e S8, pois elas correspondem a trechos de aceleração e desaceleração do Simulador de Tráfego.

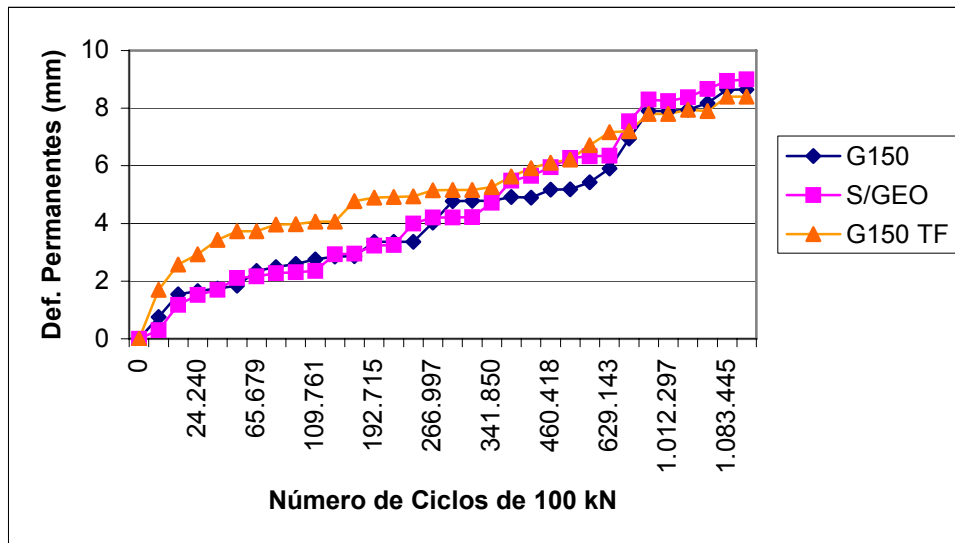


Figura 6.19 – Evolução das deformações permanentes médias nas três regiões da pista

Na Figura 6.19 se observa a evolução dos afundamentos médios em função do número de ciclos de carga aplicado pelo simulador de tráfego, nas regiões com geotêxtil G150, sem geotêxtil e com geotêxtil G150 TF.

A região da pista com o geotêxtil G150 TF obteve pior desempenho quando comparado com as duas outras regiões até os 267.000 ciclos de carga. Desse ponto em diante ambas as regiões apresentaram desempenho bastante similar, sendo que a região sem geotêxtil acabou por apresentar deformações permanentes superiores as regiões com geotêxtil. Cabe salientar que a manta geotêxtil foi incluída na linha neutra do pavimento, logo não se pode afirmar se existe relação direta entre a inclusão do geotêxtil e as deformações permanentes obtidas.

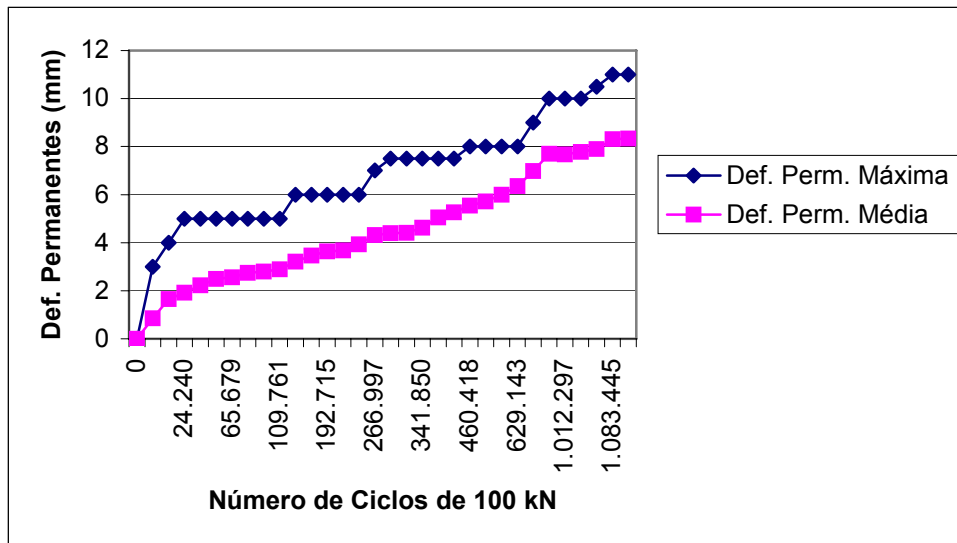


Figura 6.20 – Deformações permanentes máximas e médias

A Figura 6.20 mostra que a deformação permanente máxima teve seu valor final equivalente a 11 mm. No período de acompanhamento do presente estudo, que se deu entre 982.200 e 1.103.885 ciclos de carga, a deformação permanente máxima sofreu um aumento de aproximadamente 10%, crescendo de 10 mm para 11 mm. A deformação permanente média teve no mesmo período de 14%, crescendo de 7,3 mm para 8,3 mm.

A evolução da velocidade de deformação plástica (vdp) foi calculada para as regiões da pista com o geotêxtil G150, sem geotêxtil e com o geotêxtil G150 TF, conforme se observa nas Figuras 6.21, 6.22 e 6.23.

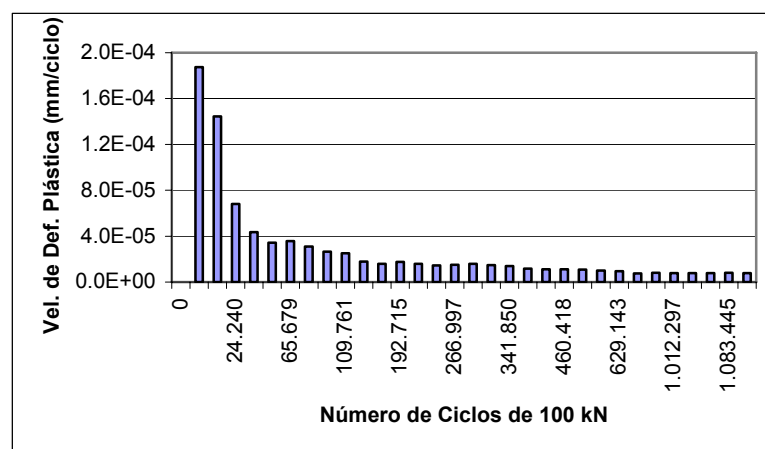


Figura 6.21 – Evolução da velocidade de deformação plástica – G150

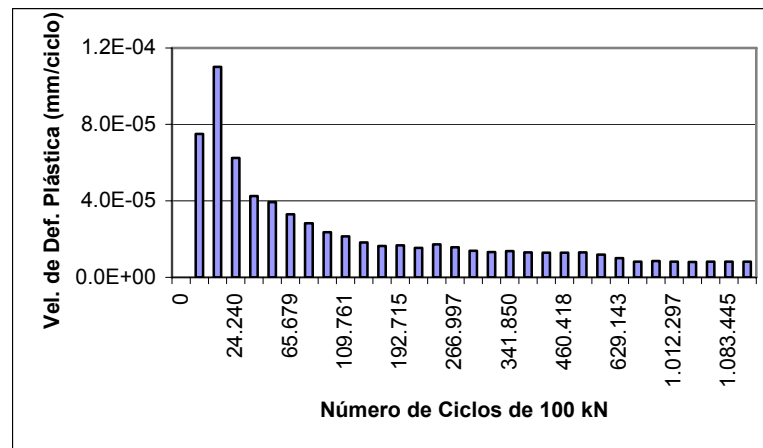


Figura 6.22 – Evolução da velocidade de deformação plástica – S/Geotêxtil

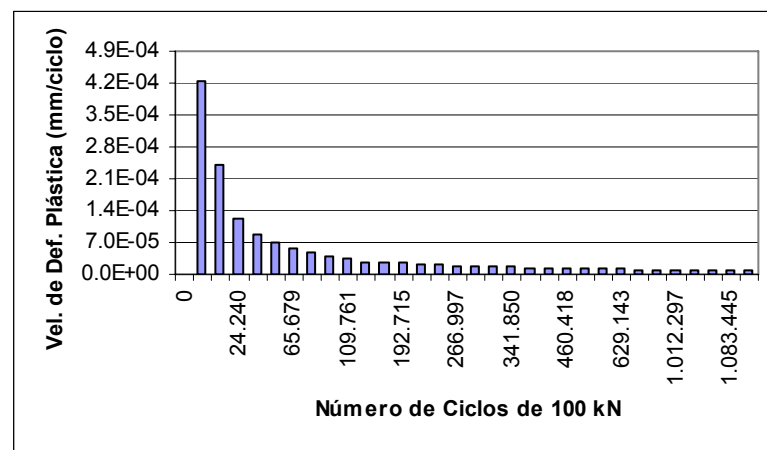


Figura 6.23 – Evolução da velocidade de deformação plástica – G150 TF

Analisando as figuras observa-se acréscimo de v_{dp} somente nos primeiros ciclos de carga aplicados, os valores máximos, em mm/ciclo, foram de $1,87 \times 10^{-4}$, $1,10 \times 10^{-4}$ e $4,25 \times 10^{-4}$, para as regiões com geotêxtil G150, sem geotêxtil e com geotêxtil G150 TF respectivamente.

Ambas as regiões apresentaram tendência à velocidade de deformação permanente constante, aproximadamente após os 109.761 ciclos de carga, o que é indicativo da acomodação da estrutura. Isso também se deve ao fato da carga de eixo ter sido mantida constante, e ter sido tomado o cuidado de não continuar com o ensaio quando a temperatura ambiente excedia os 34°C .

6.4 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL

6.4.1 Deflexões

As normas DNER (1979a) e DNER (1979b) consideram que a evolução do nível de deflexão de um pavimento, satisfatoriamente projetado e bem construído, quando exposto ao carregamento imposto pelo tráfego e ao intemperismo, envolve três fases distintas, sendo elas a fase de consolidação, fase elástica e fase de fadiga. As presentes normas também mencionam o fato de haver razoável relação entre a grandeza das deflexões recuperáveis e o desempenho dos pavimentos.

As deflexões foram medidas com o uso do defletógrafo digital, com o simulador aplicando carga de 100 kN. As deflexões características foram calculadas para as três regiões da pista e considerando a pista como um todo. Na Figura 6.24 temos as deflexões médias sob carga de eixo de 100 kN para as regiões com geotêxtil G150 e G150 TF, região sem geotêxtil e considerando a pista como um todo. Cabe salientar que as deflexões medidas na presente pesquisa constam no intervalo entre 982.200 a 1.103.885 ciclos de carga. Os valores no intervalo entre 0 e 345.540 ciclos de carga fazem parte da primeira parte do estudo (Vieira, 2002) e os valores entre 345.540 e 982.200 fazem parte da segunda parte do experimento (Núñez *et al*, 2008).

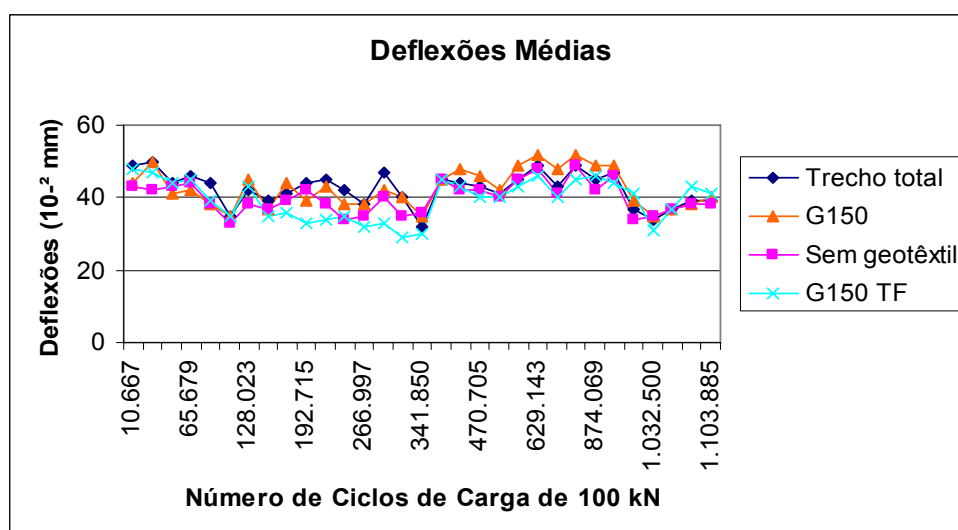


Figura 6.24 – Deflexões médias sob carga de eixo de 100 kN

As deflexões nas regiões com camadas intermediárias de geotêxtil não foram menores que as medidas nas regiões sem geotêxtil em todos os momentos, essa tendência já vinha sendo observada na fase inicial da pesquisa. Desse modo constatou-se que a inclusão de geotêxteis não se mostrou relevante na variação do nível defletométrico.

No intervalo entre 982.200 a 1.103.885 ciclos de carga analisados, verifica-se um pequeno crescimento no valor da deflexão média, sendo o valor máximo de 43×10^{-2} mm obtido na região com o geotêxtil G150 TF. A região com geotêxtil G150 e a região sem camada intermediária apresentaram valores muito próximos de deflexão no intervalo. As deflexões médias na última etapa do estudo apresentaram variação entre 31×10^{-2} e 43×10^{-2} mm.

Tendo em vista a pesquisa, desde seu início, ter sido realizada em diferentes períodos do ano, as deflexões foram corrigidas em função da temperatura através do gráfico da AASHTO (AASHTO, 1993). As deflexões foram corrigidas a duas profundidades distintas, sendo a primeira a 5 cm, camada de recapeamento, e a segunda a 9 cm, espessura total final da camada de CBUQ. Os gráficos referentes às deflexões corrigidas podem ser visualizados nas Figuras 6.25 a 6.27.

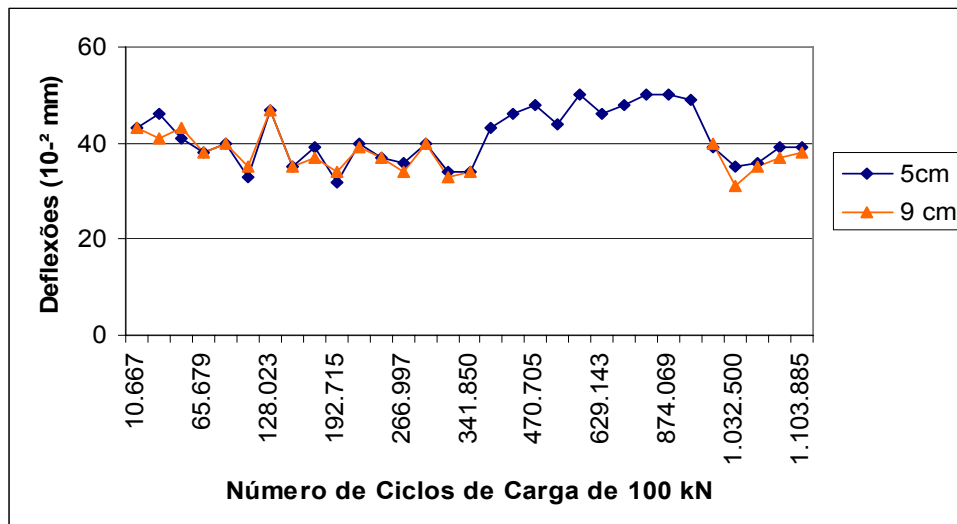


Figura 6.25 – Deflexões características corrigidas – Região com geotêxtil G150

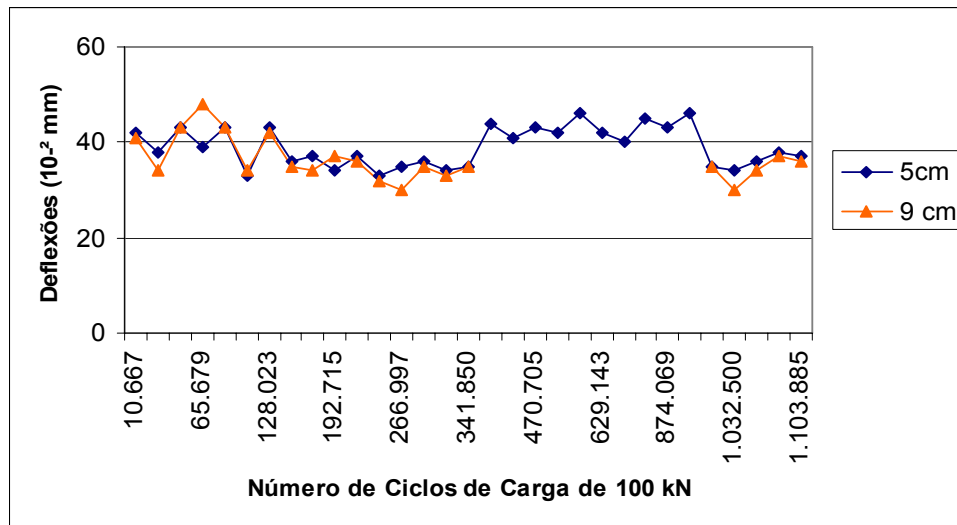


Figura 6.26 – Deflexões características corrigidas – Região sem geotêxtil

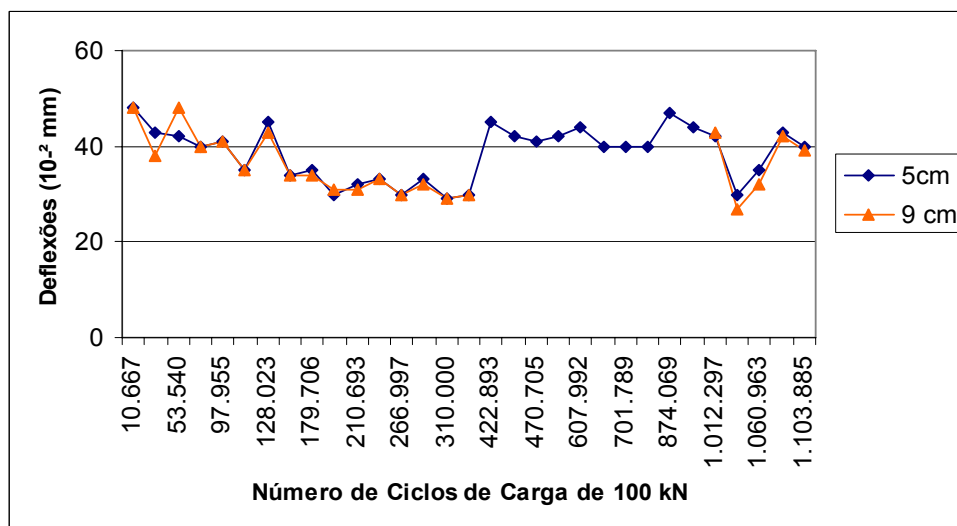


Figura 6.27 – Deflexões características corrigidas – Região com geotêxtil G150 TF

Na segunda fase da pesquisa foram tomadas as temperaturas somente a 5 cm de profundidade, motivo pelo qual a correção se deu somente a essa profundidade nesse período.

As deflexões características iniciais apresentaram valores próximos na região com o geotêxtil G150 e na região sem geotêxtil. A região com o geotêxtil G150 TF obteve um valor ligeiramente superior, tanto a 5 cm quanto a 9 cm. Essa tendência foi observada também no valor final da deflexão característica, onde a região com o geotêxtil G150 TF apresentou valores superiores.

As deflexões características corrigidas apresentaram pouca variação quando a 5 cm e 9 cm, isso foi observado em todas as regiões da pista.

Foram medidas também as bacias de deflexões, para posterior retroanálise dos módulos de resiliência das camadas asfálticas. Nas Figuras 6.28 a 6.30 temos a variação das bacias de deflexões médias para as três regiões da pista, ambas tomadas com carga de eixo de 100 kN.

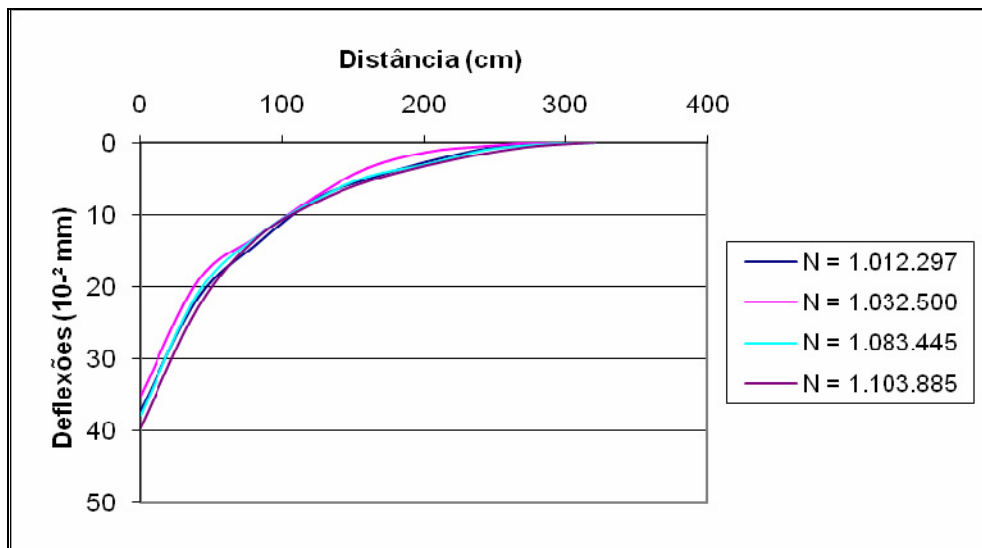


Figura 6.28 – Variação das bacias de deflexões – Região com geotêxtil G150

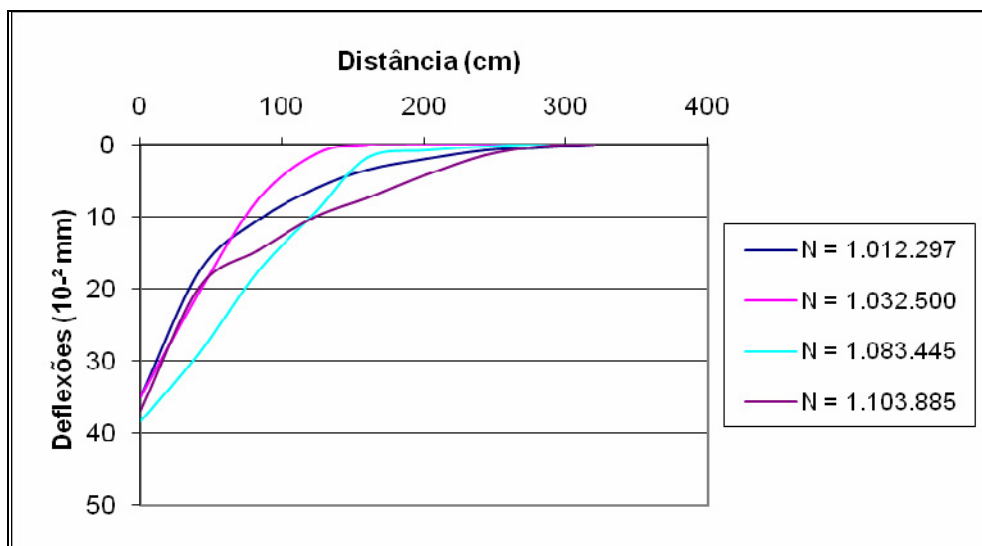


Figura 6.29 – Variação das bacias de deflexões – Região sem geotêxtil

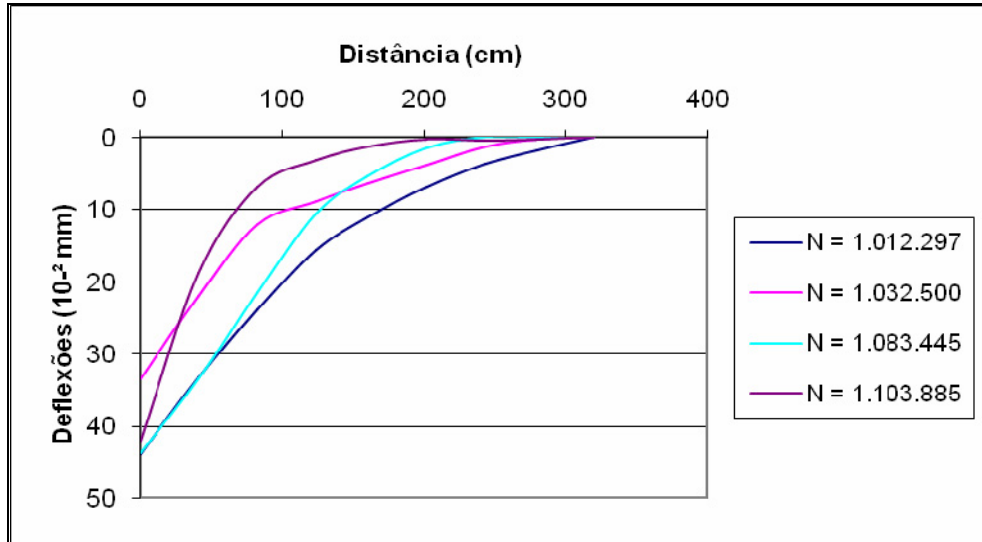


Figura 6.30 – Variação das bacias de deflexões – Região com geotêxtil G150 TF

Nas Tabelas 6.3 a 6.5 temos os raios de curvatura calculados, também para cada uma das três regiões da pista experimental. Os raios de curvatura foram calculados segundo procedimento constante em DNER (1979), ficando todos acima do valor mínimo de 100 m.

$$R = \frac{6.250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (6.2)$$

onde,

R = raio de curvatura (m);

D_0 = deflexão máxima ($10^{-2} mm$);

D_{25} = deflexão a 25 cm do centro do carregamento ($10^{-2} mm$).

Tabela 6.3 – Raios de curvatura - Região com geotêxtil G150

Número de ciclos de carga	Raio de curvatura (m)
1.012.297	298
1.032.500	272
1.083.445	400
1.103.885	356

Tabela 6.4 – Raios de curvatura - Região sem geotêxtil

Número de ciclos de carga	Raio de curvatura (m)
1.012.297	229
1.032.500	533
1.083.445	457
1.103.885	298

Tabela 6.5 – Raios de curvatura - Região com geotêxtil G150 TF

Número de ciclos de carga	Raio de curvatura (m)
1.012.297	457
1.032.500	492
1.083.445	512
1.103.885	229

A retroanálise foi realizada com o emprego do programa *Evercalc 5.0*, apresentando o módulo de resiliência uma variação entre 2.500 e 6.000 MPa para o revestimento asfáltico. O módulo de menor valor foi descartado, pois se trata de um caso isolado, provavelmente devido a inconsistências na bacia empregada no processo. Os módulos obtidos em laboratório para o revestimento asfáltico apresentaram variação entre 4.859 e 5.756 MPa, valores esses próximos aos calculados no processo de retroanálise das bacias de deflexão.

6.5 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

Foram aplicados modelos de previsão de desempenho de modo a se estimar o período de início do fenômeno de reflexão de trincas. Buscou-se na bibliografia, modelos cuja aplicação fosse possível face aos dados disponíveis da pista em estudo.

Dentre os modelos existentes, os propostos por Coelho e Queiroz (1985), HDM III e NCHRP (2004) acabaram por enquadrar-se com os dados existentes, porém somente o último dos modelos tem a opção de incluir a presença de geotêxteis na análise. Os dois primeiros modelos têm como objetivo calcular o tempo de início do trincamento por reflexão, em anos a partir da execução do recapeamento, e o último trabalha com a porcentagem de trincas a serem refletidas em função do tempo.

As equações utilizadas na análise estão representadas pelas equações 6.3 a 6.5, sendo as mesmas relativas aos modelos propostos por Coelho e Queiroz (1985), HDM III e NCHRP (2004) respectivamente.

$$AICR = \frac{(212,8 - 0,917CR_b)H^{0,681}}{[(B_a - 19,45)AAN_{0,AICR}]^{0,336}} \quad (6.3)$$

onde,

$AICR$ = ano de início do trincamento após o recapeamento;

CR_b = porcentagem de área trincada antes do recapeamento;

H = espessura do recapeamento (cm);

B_a = deflexão média após o recapeamento (10^{-2} mm);

$AAN_{0,AICR}$ = média anual do número de passagens de carga de eixo padrão pelo método da AASHTO (milhões/ano).

$$TY_{cr2} = 2,54 \exp(0,0157H_R - 0,0141PCR_4) \quad (6.4)$$

onde,

TY_{cr2} = tempo em anos para o surgimento das primeiras trincas de reflexão na superfície;

H_R = espessura da camada de recapeamento, em cm;

PCR_4 = porcentagem de área do pavimento original com trincas classe 4 da AASHTO.

$$RC = \frac{100}{1 + e^{a+bt}} \quad (6.5)$$

onde,

RC = porcentagem de trincas refletidas (%);

t = tempo (anos);

a, b = parâmetros do modelo;

h_{ac} = espessura de material asfáltico acima da camada trincada.

A Tabela 6.6 apresenta as equações para o cálculo dos valores dos parâmetros "a" e "b".

Tabela 6.6 – Parâmetros do Modelo - (NCHRP, 2004)

Tipo de Pavimento	Parâmetros	
	a	b
Flexível	$3,5 + 0,75(h_{ac})$	$-0,688584 - 3,37302(h_{ac})^{-0,915469}$

Os modelos de Coelho e Queiroz (1985) e HDM III foram aplicados fixando-se os valores referentes a espessura do recapeamento e deflexão, porém, para melhor visualizar o tempo de início do trincamento em função das condições do pavimento original, variou-se a percentagem de área trincada antes do recapeamento. Isso tornou possível o estabelecimento de intervalos em anos para o início do trincamento por reflexão, o que pode ser observado nas Figuras 6.31 e 6.32.

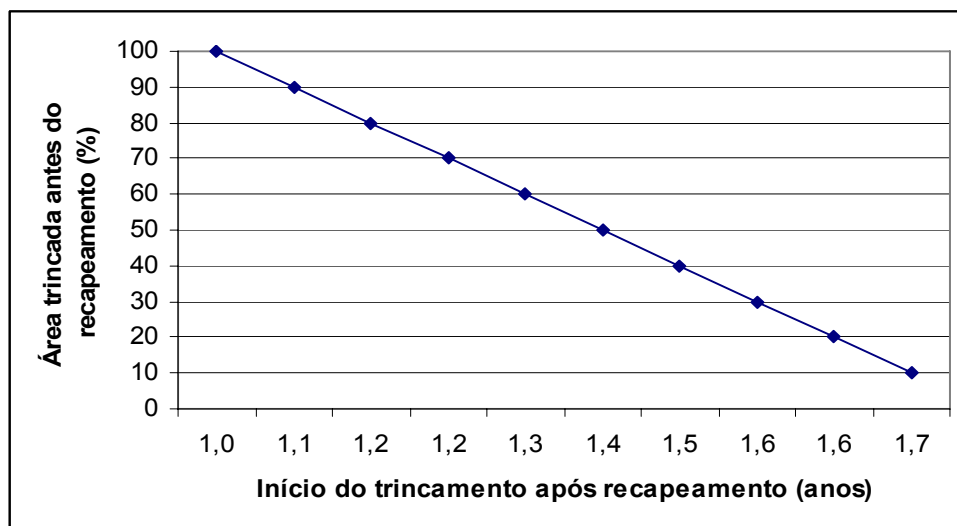


Figura 6.31 – Tempo para início do trincamento por reflexão segundo modelo de Coelho e Queiroz (1985)

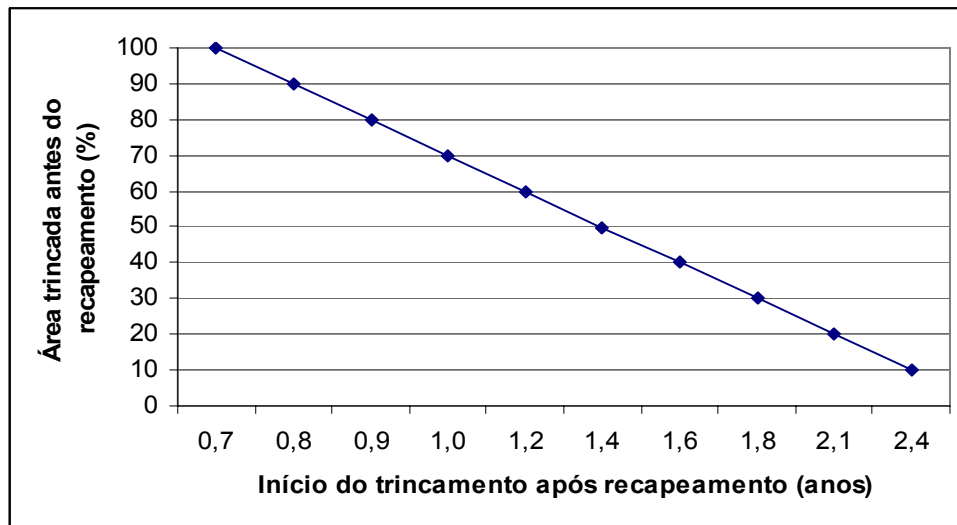


Figura 6.32 – Tempo para início do trincamento por reflexão segundo modelo do HDM III

Os modelos apresentaram intervalo entre 0,7 e 2,4 anos para início do trincamento em função das condições do pavimento original.

A percentagem de área trincada antes do recapeamento empregada na análise foi de 22%, que é o valor médio encontrado em uma situação real, quando existem trincas em todos os segmentos-testemunha de uma determinada superfície de avaliação. Essa relação foi feita uma vez que o rodado do simulador de tráfego representa um semi-eixo, e o cálculo da percentagem de área trincada seria então correspondente a 100%, o que estaria muito longe da realidade na qual os modelos foram desenvolvidos.

A Tabela 6.7 apresenta os valores calculados para a condição de 22% de área trincada antes do recapeamento na região sem geotêxtil.

Tabela 6.7 – Tempo de início do trincamento em anos

Modelo	Área trincada antes do recapeamento (%)	Início do trincamento (anos)
Coelho e Queiroz (1985)	22	1.6
HDM III	22	2

O tempo de início do trincamento, em meses, calculado pelos modelos de Coelho e Queiroz (1985) e HDM III, foi de 19.2 e 24 meses respectivamente.

Na região sem geotêxtil as primeiras trincas apareceram por volta de 436.555 ciclos de carga, que corresponde a um período de aproximadamente 14 meses desde o recapeamento. Analisando os valores calculados pelos modelos se tem um indicativo de que as primeiras trincas a aparecerem no pavimento recapeado não foram geradas pelo fenômeno da reflexão.

A análise do modelo proposto em NCHRP (2004) foi realizada de maneira semelhante à aplicada nos modelos anteriores, onde se trabalhou buscando obter um intervalo de tempo em anos para os dados da pista experimental.

Para caracterizar as regiões com geotêxtil foi considerada uma equivalência entre geossintético e asfalto de 2 polegadas, sem levar em consideração o tipo de geotêxtil empregado, apesar de ambos terem desempenho diferenciado, isto foi feito com base nas recomendações constantes em NCHRP (2004).

O modelo trabalha com a porcentagem de trincas refletidas em função dos anos passados desde o recapeamento. Realizando a junção das informações relativas ao trincamento imposto, antes do recapeamento, e ao trincamento observado no decorrer da solicitação pelo simulador de tráfego, se fez possível estimar as porcentagens refletidas em função do tempo.

Salienta-se, no entanto, que os dados relativos ao trincamento por reflexão foram estimados com base na observação de trincas em regiões compatíveis com essa condição. Isto foi necessário devido à impossibilidade em extrair corpos de prova de todas as trincas que apresentaram características de trincamento por reflexão.

O tempo em anos utilizado para o cálculo da condição de ensaio foi estimado com base no tempo decorrido desde o recapeamento, desconsiderando os períodos em que a pista não estava sendo solicitada.

As Figuras 6.33 e 6.34 apresentam os gráficos referentes a variação das trincas refletidas em função do tempo para a região sem geotêxtil e com geotêxtil, respectivamente.

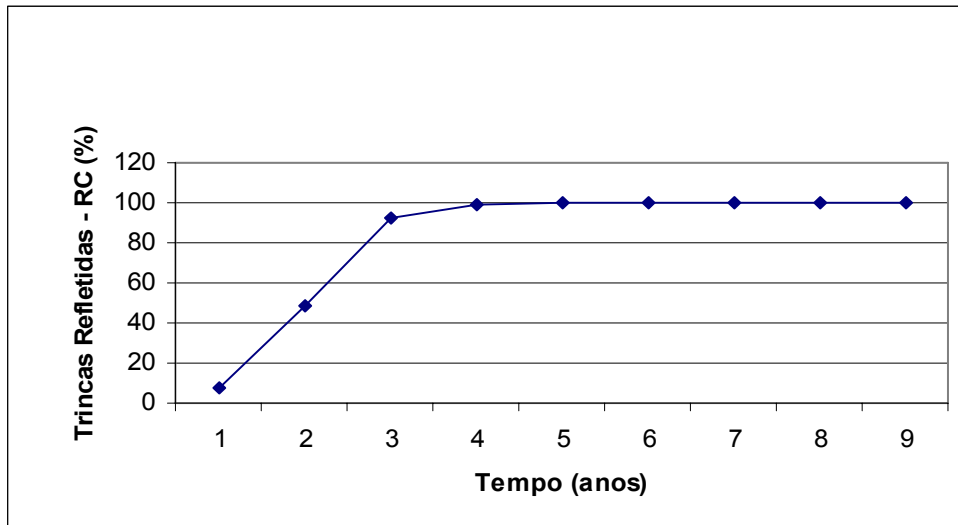


Figura 6.33 – Porcentagem de trincas refletidas por ano – Região sem geotêxtil

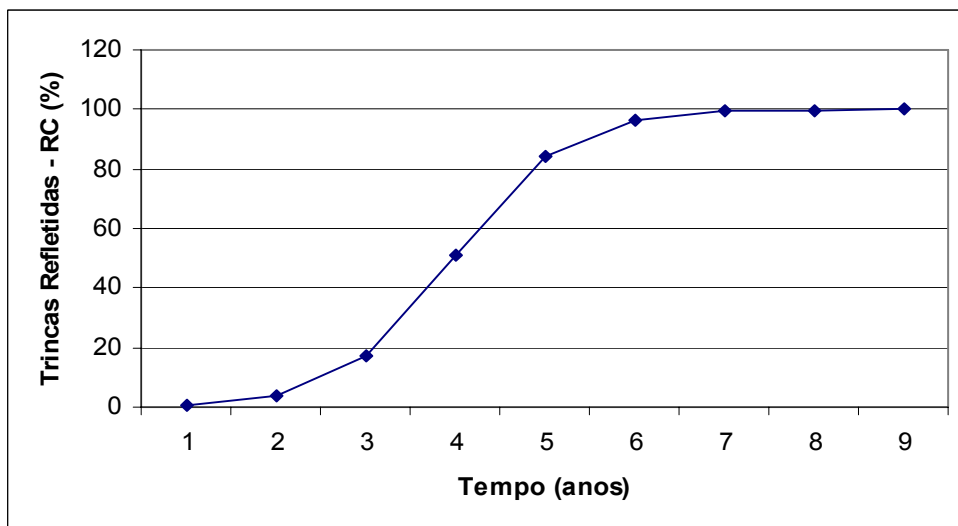


Figura 6.34 – Porcentagem de trincas refletidas por ano – Região com geotêxtil

Observa-se que a região sem geotêxtil atingiria a totalidade de trincas refletidas em aproximadamente 4 anos segundo o modelo, já a região com geotêxtil levaria por volta de 7 anos. Isto era esperado, já que em campo as regiões com geotêxtil vem obtendo desempenho superior a região sem geotêxtil.

Na Figura 6.35 observa-se as trincas que surgiram em função da solicitação da pista, e sua localização em relação ao trincamento imposto, estimando-se, desse modo, a porcentagem de trincas que foram refletidas durante o período de ensaio.

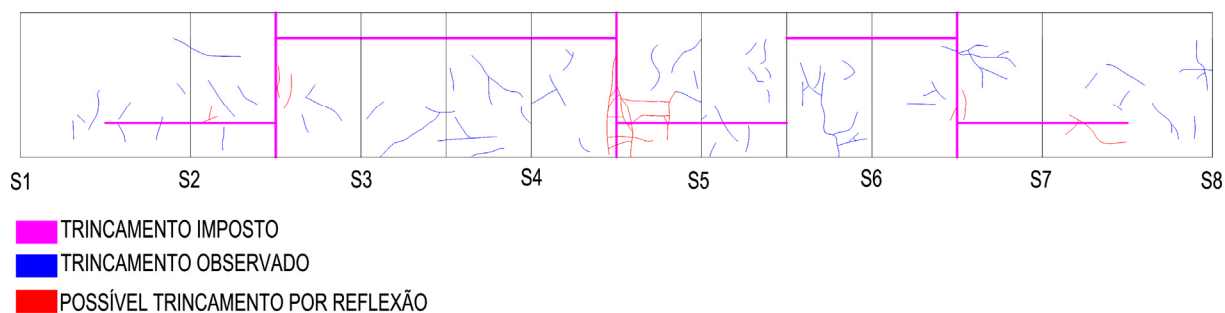


Figura 6.35 – Trincamento observado e trincamento imposto

Nas Tabelas 6.8 e 6.9 temos os tempos previstos comparados com os tempos obtidos experimentalmente para ambas as regiões da pista.

Tabela 6.8 – Modelo NCHRP (2004) – Região sem geotêxtil

Porcentagem Refletida	Tempo (anos)	
	NHCRP	Ensaio
12,5	1,23	1,2

Tabela 6.9 – Modelo NCHRP (2004) – Região com geotêxtil

Porcentagem Refletida	Tempo (anos)	
	NHCRP	Ensaio
25	3,3	1,6
62,5	4,3	1,9

Analisando as Tabelas 6.8 e 6.9 verifica-se que para a região sem geotêxtil o modelo se aproximou bastante da condição obtida em campo, o que já não se mostra verdadeiro no caso da região com geotêxtil.

Isso pode ter ocorrido devido ao fato do modelo não levar em conta as diferenças entre o desempenho dos geotêxteis empregados, bem como ao fato dos trincamentos, apesar de apresentarem uma configuração muito próxima de um caso de reflexão, não o serem.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

7.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

A partir dos resultados apresentados e analisados no Capítulo 6 da presente dissertação, é possível concluir que:

- A utilização de geotêxteis como camada intermediária em recapeamentos asfálticos gerou um aumento na vida útil do novo pavimento. A região sem geotêxtil apresentou trincamento 40% superior quando comparada a região com geotêxtil G 150, e 15% superior quando comparada a região com geotêxtil G 150 TF.
- As deflexões não sofreram nenhuma influência pela inclusão dos geotêxteis, atingindo nas regiões com camada intermediária, valores superiores aos obtidos na região sem geotêxtil.
- Os afundamentos de trilha de roda apresentaram valores finais muito próximos, porém a região sem geotêxtil alcançou o mais alto. O crescimento nas deformações permanentes entre os 982.200 e 1.103.885 foi de 10%, isto está relacionado com o controle de temperatura realizado durante o ensaio, evitando que o simulador se mantivesse em funcionamento em temperaturas muito altas.
- As velocidades de deformação plástica se mantiveram constantes durante o período do ensaio, isto se deve tanto ao fato da carga ter sido mantida constante (100 kN), quanto ao controle de temperatura.
- O trincamento ao final dos 1.103.885 ciclos de carga apresentou valores de 320 cm na região com geotêxtil G150, 554 cm na região com geotêxtil G150 TF e 764 cm na região sem geotêxtil. Observou-se diferença de desempenho entre os geotêxteis, porém em ambos os casos eles se mostraram efetivos.
- Os modelos gerados para estimar o início do trincamento se mostraram bastante efetivos nas regiões com geotêxtil. Na região sem geotêxtil o modelo se mostrou representativo na região acima do 750.000 ciclos. Isto se deve ao fato dos modelos terem sido desenvolvidos de forma bastante simplificada, buscando primeiramente um indicativo de início do trincamento que se deu no período em que a pista teve um monitoramento deficiente. O modelo tem por base a equação $DT = ae^{-e^{(-k(N-x_e))}}$, sendo as constantes de calibração para

aplicação nas três regiões da pista (região com G150, G150 TF e sem geotêxtil), encontradas no capítulo 6.

- Foram aplicados modelos para previsão do início do trincamento por reflexão, se obtendo resultados pouco próximos aos encontrados nos ensaios. Isto se deve ao fato dos modelos terem sido desenvolvidos para aplicação em situações de tráfego real, sendo necessário por vezes realizar simplificações na sua aplicação. O modelo que melhor se aproximou da situação em estudo foi o proposto por NHCRP (2004), este modelo apresenta a opção de trabalhar com geotêxteis, porem se mostrou bastante efetivo quando aplicado à região sem camada intermediária. A pequena quantidade de modelos que trabalham com o caso específico de geotêxteis também contribuiu para a pouca representatividade nos resultados encontrados.
- Os corpos de prova extraídos da pista experimental mostraram que os geotêxteis se comportaram conforme o citado na literatura, desviando as trincas oriundas do pavimento original e por conseqüência aumentando a vida útil do recapeamento.
- Foi observado trincamento do tipo *top-down cracking*, cuja origem, segundo a literatura, não é totalmente conhecida. Este trincamento pode estar relacionado com a grande variação de temperatura pela qual a pista passou durante todo o seu período de solicitação, bem como com a idade do pavimento e características dos materiais e técnicas empregados na sua execução.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Relacionar os dados obtidos na pista experimental com os dados obtidos no estudo em uma situação de tráfego real, de modo a se criar modelos de previsão de desempenho mais significativos;
- Realizar um estudo mais detalhado do padrão de trincamento conhecido por *top-down cracking* observado nesse experimento;
- Variar o padrão do trincamento imposto, de modo a se obter mais áreas em contato com o rodado do simulador de tráfego;
- Buscar modelos de previsão de desempenho para reflexão de trincas na literatura que também trabalhem com geotêxteis, e aplicá-los com base em dados tomados em situações de tráfego real;

- Manter uma estação meteorológica na Área de Teste de Pavimentos de modo a se conseguir obter dados mais precisos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1993). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures". Washington, DC, USA.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1990). "AASHTO Guidelines for Pavement Management Systems". Washington, DC, USA.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Terminologia e Classificação de Pavimentação" - NBR 7207/82.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Geossintéticos - Terminologia" - NBR 12553/03.

ALBANO, J. F., (1998). "Eficiência da Variação da Carga por Eixo e por Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

AMINI, F. (2005). "Potential Applications of Paving Fabrics to Reduce Reflective Cracking. Final Report". Jackson State University, Jackson, Mississippi.

AZAMBUJA, D.M.; CERATTI, J.A.P.; CONSTANTINO, R.; RUWER, P.M., (2004). "Avaliação do Trincamento em Recapeamento Asfáltico Através da Técnica de Ensaio Acelerados", 17º Encontro do Asfalto - IBP, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2004.

AZAMBUJA, D. M., (2004). "Estudo de Recapeamentos Asfálticos de Pavimentos Através de Ensaio Acelerados". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

BERNUCCI, L. L. B.; PREUSSLER, E. S.; VALE, A. F., (2007). "Simulador Móvel de Tráfego no Brasil - Infra-Estrutura em Rodovias - Aplicação de Novos Materiais, Concepção e Tecnologias". Coninfra - Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, São Paulo, SP, Brasil.

CERATTI, J.A.P.; RODRIGUES, R.M., (2004). "Aplicações em Restauração de Pavimentos". Manual Brasileiro de Geossintéticos, pp. 297-319, Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP, 2004.

COELHO, P. S. M.; QUEIROZ, C. A. V. *Experimental models for the performance of asphalt concrete overlays*. Rio de Janeiro: *Brazilian Road Institute*, 1985.

COETZEE, N. F.; NOKES, W.; MONISMITH, C.; METCALF, J. e MAHONEY, J., (2000). "Full-scale/accelerated pavement testing: current status and future directions A2B52: task force on full-scale/accelerated pavement testing".

COLUMBIER, G., (1989). "Fissuration des Chaussées: Nature et Origine de Fissures; Moyens pour Maîtriser leur Remontée. First International Conference on Reflective Cracking in Pavement. (Ed. Rigo and R. Degeimbre. Rilem), State University of Liege, Liege.

CROW, (1990). Surface Cracking in Asphalt Layers. Report of the Working Group "Surface Cracking in Asphalt Layers". Centre for Research and Contract Standardization in Civil Traffic Engineering. Netherlands.

CRUZ, L. L., (2005). "Estudo Comparativo do Desempenho de um Recapeamento Utilizando Asfalto-Borracha em Pavimento Flexível". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. "Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis - Procedimento A" - DNER PRO 010/79.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. "Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis - Procedimento B" - DNER PRO 011/79.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. "Pavimento - Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman" - DNER ME 024/94.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. "Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos" – DNER PRO 159/85.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 005/2003 - TER - Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 2006.

ELTAHAN, A. A. e LYTTON, R. L., (2000). Mechanistic-Empirical Approach for Modeling Reflection Cracking. Transportation Research Record nº 1730. Transportation Research Board, Washington, USA.

FREITAS, PEREIRA & PICADO; Assessment of Top-Down Cracking Causes in Asphalt Pavements; 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Universidade do Minho-DEC, 2003

FRITZEN, M.A. Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimentos Asfálticos com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis. 2005. 291 p. 29,7 cm. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005

GONÇALVES, F.P.; CERATTI, J.A.P.; RODRIGUES, R.M.; OLIVEIRA, J.A. de., (2001). "Investigação de Parâmetros que Governam a Reflexão de Trincas em Camadas Asfálticas Lançadas Sobre Geotêxteis". 11º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lima, Perú.

GONÇALVES, F.J.P., (2002). “Estudo Experimental do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados”. Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

GONÇALVES, F.J.P. "Diagnóstico e Manutenção de Pavimentos - Ferramentas Auxiliares". Passo Fundo: Editora UPF, 2007. 208p.

HASS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. “Modern Pavement Management”. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994.

HUANG, Y. H. "Pavement Analysis and Design". Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993. 805p.

LYTTON, R. “Concepts of Pavement Performance Prediction and Modeling”. In: 2nd North American Conference on Managing Pavements. 1987.

MARONI, L.G.; MONTEZ, F.T., (1995). "O Geotêxtil como Elemento Retardador da Propagação de Trincas em Recapeamentos Asfálticos - Evolução Tecnológica Sul-Americana". 29^a Reunião Anual de Pavimentação, pp. 194-214, Cuiabá, MT, Brasil.

MATSUNO, S.; NISHIZAWA, T., (1992). “Mechanism of Longitudinal Surface Cracking in Asphalt Pavement”. 7th International Conference on Asphalt Pavements. University of Nottingham.

MAXIM TECHNOLOGIES INC. (1997). "Nonwoven Paving Fabrics Study. Final Report, Submitted to the Industrial Fabrics Association International - Geotextile Division. Austin, Texas.

MECCAI, K. a; HASAN, E. al, (2004). "Geotextiles in Transportation Applications". Second Gulf Conference on Roads, Abu Dhabi.

MEDINA, J. de.; MOTTA, L.M.G. da. "Mecânica dos Pavimentos". Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2ª ed., 2005. 570p.

MONTESTRUQUE, G.E.; RODRIGUES, R.M., (1995). "Fadiga de Revestimentos Asfálticos com Camada Intermediária de Geotêxtil". 29ª Reunião Anual de Pavimentação, pp. 131-145, Cuiabá, MT, Brasil.

MONTESTRUQUE, G.E., (2002). "Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti-Reflexão de Trincas". Tese Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil.

MOTTA, L.M.G da.; BERNUCCI, L.B.; SOARES, J.B.; CERATTI, J.A.P. Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás-ABEDA, 2007.

NASCIMENTO, D. M., (2005). "Análise Comparativa de Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Flexíveis". Dissertação Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. - NCHRP Synthesis of Highway Practice 235: Application of full-scale accelerated pavement testing. 1996. TRB, National Research Council, Washington, U.S.^a

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. - NCHRP 1-37A - Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. 2004. TRB, National Research Council, Washington, U.S.A.

NÚÑEZ, W. P., (1997). "Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados". Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

NÚÑEZ, W. P., NAKAHARA, S. M., CERATTI, J. A. P., SILVEIRA, J., OLIVEIRA, J. A. de e PALMA, S., (2008). "The Efficiency of Geotextiles Delaying Crack Reflection in Asphalt Mixes Overlays Submitted to Accelerated Pavement Testing and Real Time Loading". The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition. Cancun, Mexico.

OLIVEIRA, J.A. de.; CERATTI, J.A.P.; SILVA, S.F. da.; PALMA, S.L., (2000). "Implantação de um Trecho Experimental na RS/342 - Estudo do Desempenho de Manta Geotêxtil como Retardador da Propagação de Trincas em Pavimentos Flexíveis". 15º Encontro do Asfalto - IBP, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2000.

OLIVEIRA, J.A. de.; SILVA, S.F. da.; CERATTI, J.A.P. e PALMA, S.L., (2001). "Estudo do Desempenho de Manta Geotêxtil como Retardador da Propagação de Trincas em Pavimentos Flexíveis". 11º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Lima, Perú.

OWUSU-ANTWI, E. B.; KHAZANOVICH, L. e TITUS-GLOVER, L., (1998). Mechanistic-Based Model for Predicting Reflective Cracking in Asphalt Concrete-Overlaid Pavements. Transportation Research Record nº 1629. Transportation Research Board, Washington, USA.

PATERSON, W. D. O., (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planing and Management". World Bank - The Johns Hopkins University Press - Baltimore - Maryland - USA.

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

PEREIRA, A. de S.; MOTTA, L.M.G., (2001). "Avaliação de Dois Pavimentos com Camada Intermediária de Geotêxtil no Revestimento". 33ª Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, SC, Brasil.

RODRIGUES, L.G., PREUSSLER, E.S., RODRIGUES, R.M., MARONI, L.G., MARCON, A.F., (1991). "Análise do Efeito de Geotêxteis no Recapeamento da Rodovia DF-003". 25ª Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, SP, Brasil.

RODRIGUES, R.M., (1991). "Estudo do Trincamento dos Pavimentos". Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RODRIGUES, R. M., (1998). "Performance Prediction Model for Asphalt Overlays with Geotextile Interlays on Cracked Pavements". Sixth International Conference on Geosynthetics. Atlanta, Georgia, USA.

ROHDE, L., (2007). "Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos". Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

ROLT, J.; HASIM, M. S.; HAMEED, M.; SUFFIAN, Z., (1996). "The Prediction and Treatment of Reflection Cracking in Thin Bituminous Overlays". Second Malaysian Road Conference, Innovations in Road Building, Kuala Lumpur.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. H., (2004). " Functions and Installation of Paving Geosynthetics". GeoAsia2004: 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics: Now and Future of Geosynthetics in Civil Engineering, Seoul, Korea.

SVASDISANT, T., ACHORSCH, M., BALADI, G.Y. and PINYOSUNUN, S., (2002). Mechanistic Analysis of Top-Down Cracking in Asphalt Pavements. 81st Transportation Research Board Annual Meeting. Proceedings CD-Room. Washington D.C.

VIEIRA, C.S., (2002). "Desempenho de um Pavimento Flexível Solicitado por Simulador de Tráfego". Dissertação Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

VIEIRA, C.S.; NUÑEZ, W.P.; CERATTI, J.A.P.; PALMA, S.L.; OLIVEIRA, J.A. de, (2002). "Construção de Pista Experimental com Geotêxteis Não Tecidos para Estudo de Reflexão de Trincas em Revestimentos Asfálticos". 32ª Reunião Anual de Pavimentação, pp. 861-871, Brasília - DF - Brasil.

VILCHEZ, G. E. M., (1996). "Estudo de Sistemas Anti-Reflexão de Trincas na Restauração de Pavimentos Asfálticos". Dissertação Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, SP.

WICKBOLDT, V. S., (2005). "Ensaio Acelerado de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos". Dissertação Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

WICKERT, F., (2002). "Utilização de Geotêxtil Impregnado com Asfalto na Restauração de Pavimentos Aeroportuários". VIII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA,, São José dos Campos.

WU, R.; HARVEY, J. T.; MONISMITH, C. L.; BUTTLAR, W.; MASAD, E.; DE BONDT, A. H.; HUANG, B.; CHEHAB, G.; AL-QADI, I.; WANG, J. "Towards a Mechanistic Model for Reflective Cracking in Asphalt Concrete Overlays". Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists - Proceedings of the Technical Sessions, v 75, Association of Asphalt Paving Technologists - Proceedings of the Technical Sessions 2006 Annual Meeting, 2006.

YODER, E.J., WITCZAK, K.M. "Principles of Pavement Design", New York: John Wiley, 2nd ed., 1975. 711p.

YSHIBA, J. K.; FERNANDES JUNIOR, J. L., (2005). "Modelos Estatísticos para Previsão de Desempenho de Pavimentos". Acta Scientiarum. Technology, v. 27, p. 175-181.

ZHOU, F. & SCULLION, T., (2005). "Overlay Tester: A Rapid Performance Related Crack Resistance Test". Texas Transportation Institute, Austin, Texas, Estados Unidos.