

**ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS PARA  
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RECAPEAMENTOS  
ASFÁLTICOS**

**Viviane e Silva Wickboldt**

Porto Alegre  
Setembro 2005

**VIVIANE E SILVA WICKBOLDT**

**ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS PARA  
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RECAPEAMENTOS  
ASFÁLTICOS**

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

Porto Alegre  
Setembro 2005

WICKBOLDT, Viviane e Silva

Ensaio Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos / Viviane e Silva Wickboldt. – Local: PPGEC/UFRGS, 2005.

134 p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Doutor em Engenharia. Orientador: Washington Peres Núñez.

1. Reflexão de Trincas; Recapeamentos Asfálticos; Asfalto-borracha; Ensaio Acelerados; Simulador de Tráfego I. Título

CCAA2

**VIVIANE E SILVA WICKBOLDT**

**ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS PARA  
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RECAPEAMENTOS  
ASFÁLTICOS**

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, 21 de Setembro de 2005

Prof. Washington Peres Nuñez  
D.Sc. pela UFRGS  
Orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

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

**Prof. Liedi Légi Bariani Bernucci (EPUSP)**  
D.Sc pela EPUSP

**Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUÍ)**  
Dr pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus Pais Volni e Jussára, a  
minha irmã Daiane e meu namorado Diego pela  
compreensão durante o mestrado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, além de dedicar esse trabalho a eles, aos meus pais Volni e Jussára, minha irmã Daiane e ao meu namorado, Diego, pela paciência e consideração que tiveram comigo. E também que estiveram sempre ao meu lado em todos os momentos de minhas conquistas.

Ao professor Washington Peres Nuñez pela orientação, pela dedicação e pelo incentivo.

Agradeço ao professor Jorge Augusto Ceratti pela colaboração e pelo apoio.

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

Agradeço a uma pessoa muito especial que teve ao meu lado no decorrer desta jornada, Juliana Bernardes, que se tornou uma grande amiga e companheira.

Aos bolsistas, Rafael Magro, Tiago Moch e Daniel Victorino, pela seriedade, pela pontualidade e principalmente pela dedicação durante o trabalho.

Ao professor Luciano Pivoto Specht, pelas sugestões que contribuíram para minha dissertação.

Agradeço a equipe técnica do LAPAV: Carlos Ivan H. Ribas, Ivo de Azevedo e Vinicius da Silva Alves pela dedicação, pela experiência e pela ajuda aos ensaios realizados.

Ao mestrando Lélío A. T. Brito, pelo auxílio e competência na realização dos ensaios da pesquisa.

A minha amiga e professora, Dulce Pereira pelo auxílio nas traduções de inglês, pela confiança e principalmente pelo incentivo.

Ao doutorando Fernando Albuquerque pelas informações e principalmente pelas ajudas que me auxiliaram na conclusão desta pesquisa.

Agradeço a todos colegas de mestrado e doutorado, e principalmente aqueles que se tornaram meus amigos, Aline Denardin, Daniela de David, Diana Azambuja, Diego Wesseling, Luciana Rohde, Danielle Clerman e pelo convívio ao longo desta conquista.

Ao Grupo Greca Asfaltos pela colaboração, em especial, ao engenheiro Armando Morilha pela dedicação e pelo incentivo durante a pesquisa.

A UNIVIAS pela colaboração prestada no decorrer do trabalho, em especial, os engenheiros que auxiliaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

O amor, o trabalho e o conhecimento são as fontes de  
nossa vida; também deveriam governá-la.

*Reich*



## RESUMO

WICKBOLDT, V.S. **Ensaio Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Esta dissertação apresenta uma 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. Para a realização do estudo foi construído um pavimento experimental com camada final de terraplenagem de argila arenosa de comportamento laterítico (50 cm), base de brita graduada (30 cm), camada de concreto asfáltico trincado (4 cm) e camada de recapeamento em asfalto-borracha (5 cm). O simulador de tráfego DAER/UFRGS aplicou aproximadamente 513.000 ciclos de carga de eixo de 100 kN. Ao longo do experimento o desempenho do pavimento foi acompanhado, com ênfase no surgimento de trincas. A evolução da condição estrutural do pavimento foi monitorada através das medidas de deflexões e dados de instrumentação (tensões e deformações). O registro da evolução da condição funcional do pavimento foi feito através do levantamento de afundamento de trilha de roda, e macro e micro textura. Com a finalidade de comparar o desempenho do recapeamento em asfalto-borracha com os de outros recapeamentos convencionais previamente ensaiados, desenvolveu-se um procedimento para correção de temperaturas. Constatou-se que o emprego de asfalto-borracha retardou em cinco vezes o surgimento de trincas. Assim, o nível de severidade do trincamento igual a  $100 \text{ cm/m}^2$  ocorreu no recapeamento em asfalto-borracha após 340.000 solicitações (100 kN), enquanto no recapeamento em asfalto convencional tal nível de severidade foi registrado com somente 66.000 solicitações da mesma carga de eixo. Globalmente, o recapeamento em asfalto-borracha conferiu ao pavimento melhores condições funcionais e estruturais, se comparado com um recapeamento convencional da mesma espessura, executado sobre um pavimento com níveis de degradação similares.

Palavras-chave: reflexão de trincas, recapeamentos asfálticos, asfalto-borracha, ensaios acelerados, simulador de tráfego.

## ABSTRACT

WICKBOLDT, V.S. **Accelerated Pavement Testing to Evaluate the Performance of Asphalt Overlays**. 2005. MSc Dissertation (Civil Engineering) Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

This research discusses the efficiency of asphalt-rubber overlays in cracks reflection delaying, based in APT data. In order to carry the study, a test section was built over a lateritic sandy clay subgrade. The pavement included a 30 cm thick granular base, a 4 cm thick cracked asphalt concrete and 5 cm thick asphalt-rubber overlay. A linear traffic simulator applied nearly 513,000 cycles of 100-kN axle load. During trafficking the pavement performance was followed, emphasis being given to cracking. The pavement structural condition was monitored by deflection measurements and instrumentation (stress and strain) data. Rut depths and pavement texture were measured as part of the functional evaluation. In order to compare the performance of the focused asphalt-rubber to those of conventional asphalt concrete overlays previously tested, a procedure to correct testing temperatures was developed. It was found out that cracks appeared in the asphalt-rubber overlay nearly 5 times later than in the AC conventional one. The same cracking severity index of 100 cm/m<sup>2</sup> that occurred after 340,000 loading cycles in the asphalt-rubber overlay, was computed after just 66,000 cycles in the conventional AC overlay. All in all, the asphalt-rubber overlay provided the pavement better functional and structural conditions, than a conventional AC overlay with identical thickness would.

Key-words: cracking reflection, overlays, asphalt-rubber, APT, traffic simulator

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>18</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	21
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	22
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	23
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA. ....</b>	<b>24</b>
2.1 TRINCAS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS .....	24
2.2 REFLEXÃO DE TRINCAS .....	30
2.3 ASFALTO-BORRACHA.....	32
2.4 EXPERIMENTOS REALIZADOS COM SIMULADOR DE TRÁFEGO .....	36
2.4.1 Síntese das principais contribuições recentes dos ensaios acelerados em pavimentos. ..	38
<b>3 CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
3.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO SOLICITADO .....	41
3.1.1 Características da Camada Final de Terraplenagem (CFT) e dos materiais granulares .	42
3.1.2 Características da Mistura Asfálticas .....	44
3.2 EXECUÇÃO DO PAVIMENTO EXPERIMENTAL .....	47
3.3 EXECUÇÃO DO RECAPEAMENTO .....	49
<b>4 CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO.....</b>	<b>54</b>
<b>5 METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>60</b>
5.1 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL .....	60
5.1.1 Medidas Defelctométricas .....	60
5.1.1.1 Viga Benkelman .....	61
5.1.1.2 Viga eletrônica.....	62
5.1.1.3 Correções das deflexões .....	63
5.1.2 Tensões e Deformações .....	65
<b>5.2 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO .....</b>	<b>69</b>
5.2.1 Reflexão de Trincas .....	69
5.2.2 Deformações Permanentes .....	70
5.3 PARÂMETROS DE TEXTURA SUPERFICIAL .....	71

5.3.1 Pêndulo Britânico .....	72
5.3.2 Mancha de Areia .....	73
5.4 PARÂMETROS AMBIENTAIS.....	74
5.5 ANÁLISE MECÂNISTICA.....	75
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
6.1 CONDIÇÕES DO PAVIMENTO EXPERIMENTAL DO INÍCIO DO ESTUDO ANALISADO NESTA DISSERTAÇÃO .....	76
6.2 HISTÓRICO DE CARREGAMENTO .....	77
6.3 PARÂMETROS AMBIENTAIS.....	78
6.4 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL.....	82
6.4.1 Deflexões .....	82
6.4.2 Bacias Deflectométricas e Módulos retroanalizados .....	91
6.4.3 Raio de Curvatura.....	94
6.4.4 Efeito das Temperaturas no Comportamento Elástico das Misturas .....	96
6.4.5 Tensões Medidas nas Interfaces das Camadas Asfálticas .....	99
6.4.6 Deformções .....	100
6.5 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO .....	105
6.5.1 Deformações Permanentes .....	105
6.5.2 Trincamento .....	110
6.6 PARÂMETROS DE TEXTURA SUPERFICIAL.....	121
6.6.1 Microtextura .....	121
6.6.2 Macrotextura .....	124
<b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>126</b>
7.1 CONCLUSÕES DESTA PESQUISA.....	126
7.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS.....	128
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>129</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Modos de faturas definidas por Rodrigues (1991) .....	28
Figura 3.1: Estrutura do pavimento ensaiado. ....	42
Figura 3.2: Pista experimental com a localização das AT e ANT. ....	47
Figura 3.3: Trincamento padrão imposto ao pavimento experimental .....	48
Figura 3.4: Localização dos sensores na pista experimental .....	49
Figura 4.1: Simulador de Tráfego UFRGS/ DAER-RS. ....	55
Figura 4.2: Rodado em cima do pavimento .....	56
Figura 4.3: Retorno do rodado.....	58
Figura 5.1: Viga Benkelman.....	62
Figura 5.2: Vista lateral do deflectógrafo digital e da rodinha com odômetro ao rodado do simulador. ....	63
Figura 5.3: Fatores de correção para o recapeamento em asfalto-borracha pela AASHTO. ...	64
Figura 5.4: Fatores de correção das deflexões em função das temperaturas obtidas em ensaios. ....	64
Figura 5.5: Exemplo de leitura dos sensores. ....	65
Figura 5.6: Forma típica dos pulsos de tensão vertical.....	66
Figura 5.7: Forma típica dos pulsos de tensão horizontal. ....	67
Figura 5.8: Forma típica dos pulsos de deformação longitudinal.....	67
Figura 5.9: Forma típica de pulsos de deformação transversal. ....	68
Figura 5.10: Forma típica de pulsos de deformação a 45°. ....	68
Figura 5.11: Trincas pintadas em cores diferentes indicando a ordem do surgimento. ....	69
Figura 5.12: Grade metálica usada no mapeamento de trincas. ....	70
Figura 5.13: Transverso-perfilógrafo. ....	71
Figura 5.14: Pêndulo Britânico.....	72
Figura 5.15: Mancha de Areia. ....	73
Figura 5.16: Termômetro digital. ....	74
Figura 6.1: Histórico de carregamento da pesquisa com carga de eixo de 100 kN.....	77
Figura 6.2: Precipitações pluviométricas durante a solitação do pavimento.....	79
Figura 6.3: Temperaturas diárias.....	80
Figura 6.4: Distribuição de frequência das temperaturas máximas do ar.....	80
Figura 6.5: Distribuição de frequência de temperaturas máximas durante vários estudos de reflexão de trincas. ....	81

Figura 6.6: Deflexões médias sob carga de eixo de 82 kN. ....	82
Figura 6.7: Deflexões médias sob carga de eixo de 100 kN. ....	84
Figura 6.8: Deflexões médias sob carga de eixo de 120 kN. ....	84
Figura 6.9: Deflexões características corrigidas sob carga de eixo de 82 kN. ....	85
Figura 6.10: Deflexões características corrigidas sob carga de eixo de 100 kN. ....	86
Figura 6.11: Deflexões características corrigidas sob carga de eixo de 120 kN. ....	87
Figura 6.12: Comparativo das deflexões características nas ANT dos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz. ....	88
Figura 6.13: Comparativo das deflexões características nas AT dos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz. ....	89
Figura 6.14: Bacias deflectométricas nas ANT sob carga de eixo de 82 kN. ....	91
Figura 6.15: Bacias deflectométricas nas AT sob carga de eixo de 82 kN. ....	92
Figura 6.16: Bacias deflectométricas nas ANT sob carga de eixo de 100 kN. ....	92
Figura 6.17: Bacias deflectométricas nas AT sob carga de eixo de 100 kN. ....	93
Figura 6.18: Bacias deflectométricas sob cargas de eixo de 82 e 100 kN para $N= 479.477$ . ..	93
Figura 6.19: Raio de curvatura sob carga de eixo de 82 kN.....	96
Figura 6.20: Raio de curvatura sob carga de eixo de 100 kN. ....	95
Figura 6.21: Contribuição das camadas na deflexão calculada a $t= 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ....	98
Figura 6.22: Contribuição das camadas de deflexão calculada a $t= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ....	98
Figura 6.23: Contribuição das camadas de deflexão calculada a $t= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ....	99
Figura 6.24: Tensões horizontais geradas por carga de eixo de 100 kN. ....	100
Figura 6.25: Deformações horizontais na direção longitudinal. ....	101
Figura 6.26: Deformações horizontais na direção transversal. ....	102
Figura 6.27: Deformações horizontais na direção $45\text{ }^{\circ}$ . ....	102
Figura 6.28: Deformações principais obtidas. ....	104
Figura 6.29: Posição da linha neutra no pavimento. ....	105
Figura 6.30: Deformações permanentes médias nas ANT e AT . ....	106
Figura 6.31: Deformação permanente máxima e média. ....	106
Figura 6.32: Evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp)- AT. ....	107
Figura 6.33: Evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp)- ANT. ....	108
Figura 6.34: Comparativo da ATR dos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz.....	108
Figura 6.35: Comparativo dos recapeamentos (AB, AC Azambuja e AC Cruz) correlacionados ATR pela raiz de N. ....	109
Figura 6.36: Evolução do trincamento nas ANT e AT. ....	110

Figura 6.37: Evolução total do trincamento. ....	111
Figura 6.38: Foto do trincamento na seção 3 quando N= 205.000. ....	111
Figura 6.39: Foto do trincamento na seção 3 quando N= 462.000. ....	112
Figura 6.40: Evolução do trincamento N= 123.356 aparecimento do 1° trincamento (Cruz, 2005). ....	112
Figura 6.41: Evolução do trincamento N= 146.477. ....	112
Figura 6.42: Evolução do trincamento N= 206.535. ....	113
Figura 6.43: Evolução do trincamento N= 294.041. ....	113
Figura 6.44: Evolução do trincamento N= 320.415. ....	113
Figura 6.45: Evolução do trincamento N= 339.150. ....	113
Figura 6.46: Evolução do trincamento N= 379.474. ....	114
Figura 6.47: Evolução do trincamento N= 462.381- surgimento das últimas trincas. ....	114
Figura 6.48: Evolução do trincamento N=513.000 . ....	114
Figura 6.49: Comparativo da evolução do trincamento nos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz. ....	115
Figura 6.50: Temperaturas médias. ....	116
Figura 6.51: Distribuição de frequências para faixas de temperaturas. ....	117
Figura 6.52: Leituras com o Pêndulo Britânico. ....	122
Figura 6.53: Comparativo dos recapeamentos das leituras com Pêndulo Britânico.....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Módulos de resiliência e resistência à tração. ....	51
Tabela 3.2: Módulos de resiliência, resistência à tração e grau de compactação dos CPs extraídos da pista. ....	52
Tabela 6.1: Grau de compactação dos CPs extraídos no final do período de ensaios.....	90
Tabela 6.2: Deflexões medidas com a viga Benkelman e viga eletrônica. ....	94
Tabela 6.3: Deflexões calculadas pelo programa Elsym5.....	97
Tabela 6.4: Deformações medidas e calculadas na estrutura. ....	103
Tabela 6.5: Entrada de dados para análise mecânica. ....	118
Tabela 6.6: Módulos das camadas asfálticas durante o tráfego no recapeamento em AC... ..	119
Tabela 6.7: Deformações de extensão na base da camada subjacente e vida de fadiga.....	119
Tabela 6.8: Módulos das camadas asfálticas correspondentes e temperaturas medidas durante o tráfego no recapeamento AC .....	120
Tabela 6.9: Deflexões de extensão na base da camada subjacente e vida de fadiga. ....	120
Tabela 6.10: Resultados do ensaio da “Mancha de Areia”. ....	125



## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Categoria de defeitos dos pavimentos. ....	25
Quadro 2.2: Níveis de severidade do afundamento de trilha de roda.....	25
Quadro 2.3: Abertura de trinca. ....	29
Quadro 2.4: Fatores que influenciam a vida de fadiga de misturas asfálticas.....	30
Quadro 3.1: Propriedades do solo argiloso utilizado como camada final de terraplenagem. ....	43
Quadro 3.2: Propriedades da brita graduada utilizada como base. ....	43
Quadro 3.3: Composição granulométrica dos agregados.....	44
Quadro 3.4: Parâmetros Marshall da mistura asfáltica com asfalto-borracha.....	45
Quadro 3.5: Propriedades do ligante modificado (Ecoflex B).....	45
Quadro 3.6: Características dos ligantes asfálticos utilizados nas misturas.....	46
Quadro 3.7: Informações relacionadas ao recapeamento. ....	49
Quadro 4.1: Tempo de operação do simulador para simula $10^6$ carga de eixo padrão. ....	57
Quadro 5.1: Carga e inflação dos pneus. ....	61
Quadro 6.1: Aplicação da carga de eixo de 100 kN por mês. ....	78
Quadro 6.2: Classificação do revestimento quanto à resistência à derrapagem. ....	122
Quadro 6.3: Classificação da textura em função da altura da mancha. ....	124

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*
- AB: Asfalto-borracha
- ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AC: Asfalto-convencional
- ADOT: *Arizona Department of Transportation*
- AI: *Asphalt Institute*
- AT: Área trincada no pavimento
- ANT: Área não trincada no pavimento
- ANIP: Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
- APT: *Accelerated Pavement Testing*
- ASTM: *American Society of Testing and Materials*
- ATR: Afundamento de trilha de roda
- BPN: *British Pendulum Number*
- CAM: *Crack Activity Meter*
- CALTRANS: *Califórnia Department of Transportation*
- CAL/ APT: *Califórnia Department of Transportation Accelerated Pavement Testing*
- CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo
- CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente
- CFT: Camada final de terraplanagem
- CRCP: *Continuously Reinforced Concrete Pavement*
- CRM: *Crumb Rubber Modified*
- CM: *Crack Movement*
- CP: Corpo-de-prova
- DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
- DMT: Distância Média de Transporte

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DOT: *Department de Transport*

$\epsilon_x$ : Deformação longitudinal

$\epsilon_y$ : Deformação transversal

$\epsilon_{x,y}$ : Deformação a 45°

$\epsilon_1, \epsilon_2$ : Deformações principais

ESALs: *Equivalent Single axle loads*

FHWA: *Federal Highway Administration*

FWD: *Falling Weight Deflectometer*

HMA: *Hot Mix Asphalt*

HVS: *Heavy Vehicle Simulator*

ISC: Índice de Suporte Califórnia

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MR: Módulo de resiliência

N: Número de ciclos de cargas realizados pelo simulador de tráfego

$N_f$ : vida de fadiga

Psi: *Present Serviceability Index*

PPGEC: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

RBV: Relação Betume Vazios

REFAP: Refinaria Alberto Pasqualini

RRT: Resistência Retida à Tração

RT: Resistência à tração por compressão diametral

S: seções do pavimento

SBR: Borracha – Butadieno – Estireno

Shrp: *Strategic Highway Research Program*

SGC: Compactador Giratório Superpave

SUPERPAVE™: *Superior Performance Asphalt Pavements*

$\mu$  : Coeficiente de Poisson

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VV: Volume de Vazios

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

No Brasil, segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), a frota de automotores gera mais de 30 milhões de pneus usados por ano. Desse montante, 65% são descartados de maneira incorreta.

Como possível destino adequado à grande quantidade de resíduos sólidos provenientes da borracha e do descarte dos pneus destaca-se o seu emprego na constituição de misturas asfálticas, sendo ainda de pouca utilização no Brasil.

O uso do asfalto-borracha além de ser uma forma nobre de dar destino aos pneus descartados, reduzindo impactos ambientais ao meio ambiente, melhora as propriedades e o desempenho de misturas asfálticas.

O aumento de solicitações atuantes nos pavimentos rodoviários faz com que aumente o interesse em pesquisas de novas tecnologias e materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos.

Este material pode ser utilizado na pavimentação através da mistura com ligante asfáltico (processo úmido) ou como parte do agregado (processo seco). Nesta pesquisa estuda-se o comportamento de um recapeamento em que a mistura asfáltica foi fabricada com um ligante modificado pela incorporação de borracha (asfalto-borracha).

O surgimento de trincas é um dos mecanismos de degradação dos pavimentos de maior significância técnica e econômica, e um dos maiores causadores de fracos desempenhos. Na tentativa de estabelecer um nível aceitável de serventia, varias técnicas de restauração podem ser empregadas, dentre elas, a utilização de asfaltos modificados (asfalto-borracha) na execução de camadas de reforço de pavimentos (recapeamento).

O emprego do asfalto-borracha representa um acréscimo no custo da mistura. É necessário saber se esse aumento será compensado por uma maior vida útil do recapeamento e para tal é

preciso comparar a reflexão de trincas em recapeamentos com ligantes convencionais e com asfalto-borracha.

Tendo em vista a perspectiva alcançada com a modificação efetiva do ligante, muitas pesquisas e aplicações práticas vem sendo desenvolvidas, particularmente com mais ênfase no campo dos ligantes modificados por via úmida, como será demonstrado neste trabalho e cuja tecnologia foi concebida pelo Grupo Grega Asfaltos.

Esta pesquisa visa quantificar a eficiência do recapeamento com asfalto-borracha, no retardamento de reflexões de trincas.

A parte experimental da pesquisa foi realizada na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, localizada no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre. Nesse laboratório já se realizaram estudos empregando diversas técnicas e materiais retardadores de reflexão, tais como geotexteis (Viera, 2002), tratamento superficial com asfalto modificado com polímeros (Azambuja, 2004) e recapeamentos em concreto asfáltico convencional (Azambuja, 2004 e Cruz, 2005). Esta dissertação dá continuidade à pesquisa sobre misturas asfálticas com ligante modificado com borracha em laboratório (Specht, 2004) e em pistas experimentais (Cruz, 2005), quantificando-se a eficiência de concreto asfáltico com ligante modificado por borracha como retardador de reflexão de trincas.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar e comparar a eficiência de um recapeamento em concreto asfáltico constituído por mistura com asfalto-borracha (processo úmido), através de ensaios acelerados, utilizando o Simulador de Tráfego Linear DAER/UFRGS.

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- Monitorar e registrar o surgimento de trincas no recapeamento em asfalto-borracha;
- Monitorar a evolução da condição estrutural do pavimento experimental, através de medidas de deflexões e de dados da instrumentação (tensão e deformação);

- Registrar a evolução da condição funcional do pavimento, através de levantamentos de afundamento de trilha de roda e de macro e micro textura;
- Comparar o desempenho de recapeamento em asfalto-borracha com outros recapeamentos previamente solicitadas na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos;
- Avaliar o efeito das temperaturas médias nos períodos de ensaios em diferentes recapeamentos com asfalto convencional e modificado com borracha no surgimento e evolução de trincas.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada, além deste capítulo introdutório, em mais 6 capítulos.

No capítulo 2 está apresenta-se uma Revisão Bibliográfica, na qual faz-se um histórico de estudos já desenvolvidos na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, enfatizando a reflexão de trincas.

No capítulo 3 apresenta-se um detalhado relato sobre a construção da pista experimental.

No capítulo 4 descrevem-se as características do Simulador de Tráfego.

No capítulo 5 apresenta-se uma descrição da metodologia empregada na pesquisa.

No capítulo 6 apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos pela aplicação de cargas no pavimento experimental, com o Simulador de Tráfego DAER/UFRGS. Faz-se também um comparativo com resultados de estudos semelhantes realizados por Azambuja (2004) e Cruz (2005).

No capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do estudo e algumas sugestões para pesquisas futuras.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

Pavimento rodoviário, segundo Pinto (2002), é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura.

Pinto (2002) define pavimento flexível como aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Medina (1997) define que pavimento flexível é aquele constituído por um revestimento betuminoso sobre a base granular ou de solo estabilizado granulometricamente.

### **2.1 TRINCAS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS**

Devido ao aumento do número de solicitações, velocidades de tráfego e capacidade de carga dos pavimentos surge cada vez mais rápido o processo de degradação do pavimento.

Existem tipos de categoria de defeitos, de acordo com o DNER/98, que explicam a deterioração dos pavimentos, que são: trincamentos, deformações e desagregação, mostrados no Quadro 2.1.

Conforme YODER & WITCZAC (1975) a deformação permanente na trilha de roda pode ser definida como uma distorção na superfície do pavimento causada pela consolidação de uma ou mais camadas desse pavimento. A norma americana ASTM D 5340 (1997) define esse defeito como uma depressão superficial na trilha de roda, podendo ocorrer o levantamento das bordas ao longo da trilha, em que o aumento excessivo da deformação permanente pode provocar a ruptura da estrutura do pavimento.



Quadro 2.1 Categoria de defeitos dos pavimentos

Categoria do Defeito	Causa Genérica	Causa Específica
Trincamento	Associada com tráfego	Cargas repetidas (Fadiga)
		Carga excessiva
		Escorregamento de carga
	Não associadas com tráfego	Mudanças de Umidade
		Retração (propagação)
		Mudanças térmicas
Deformação	Associada com tráfego	Carga excessiva (cisalhamento)
		Fluência Plástica
		Densificação (compactação)
	Não associada com tráfego	Expansão
		Consolidação de substratos
Desagregação	Associada com tráfego	Degradação do agregado
	Não associada com tráfego	Falta de qualidade dos materiais

(Mt/DNER/IPR/98)

De acordo com a norma americana ASTM D 5340 (1997) a deformação permanente na trilha de roda é classificada em três níveis de severidade, como mostra a Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Níveis de severidade do afundamento na trilha de roda

Nível de Severidade na Seção	Profundidade na Trilha de Roda	
	Polegadas	mm
Baixo	¼ a ½	6 a 13
Médio	> ½ a 1	> 13 a 25
Alto	> 1	> 25

(ASTM- D5340, 1997)

A norma brasileira, através do documento DNER- TER 001/78, define como afundamento à deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada ou não de solevamento. O solevamento corresponde à diferença de altura do perfil original da superfície do pavimento e a pertuberância que se forma na lateral do sulco da roda. A norma classifica esse afundamento em dois tipos: plástico e de consolidação.

O afundamento plástico é caracterizado como afundamento acompanhado de solevamento. Quando ocorre em extensão até 6 m é denominado afundamento plástico local e quando ocorre maior e ao longo da trilha de roda é denominado afundamento plástico da trilha.

O afundamento de consolidação é caracterizado como afundamento sem solevamento. Quando ocorre em extensão de até 6 m é denominado afundamento de consolidação local e quando em extensão maior e ao longo da trilha de roda é denominado afundamento de consolidação da trilha.

Um dos maiores causadores de perda de desempenho das rodovias é o surgimento de trincas, onde este fenômeno está relacionado às diversas formas de degradação dos pavimentos flexíveis.

Segundo Maroni e Montez (1995), a diminuição da impermeabilidade é uma das conseqüências negativas do aparecimento de fissuras no pavimento, fazendo com que as águas pluviais penetrem em sua estrutura. Pode este fator ser tão importante no que se refere à durabilidade do pavimento, principalmente em regiões de elevada pluviosidade.

As principais causas, citadas entre diversos autores, desse tipo de ruptura são:

- A ação repetida das cargas de tráfego, caracterizando a fadiga dos revestimentos asfálticos;
- Envelhecimento da camada asfáltica (oxidação do ligante) tornando o revestimento mais rígido, conseqüentemente mais frágil, favorecendo ao trincamento;
- Baixas temperaturas, caracterizando uma ruptura frágil;
- Altas variações térmicas diárias, comuns no Rio grande do Sul.

Durante a vida de serviço, os pavimentos estão sujeitos a carga de tráfego induzindo tensões e deformações nos diferentes materiais e componentes. No caso de pavimentos asfálticos, a

tensão de tração repetida na fibra inferior da camada asfáltica atinge um processo de fadiga definida como deterioração localizada, permanente e progressiva nas propriedades estruturais do material.

O processo de fadiga é definido como a iniciação e propagação de trincas através de uma camada asfáltica, com as seguintes condições: a camada asfáltica contínua se comporta como um contínuo homogêneo e conseqüentemente, o trincamento se manifesta como uma redução na rigidez aparente da camada.

Monismith e Deacom (1969) definem fadiga como um processo de alterações estruturais progressivas, localizadas e permanentes, que ocorre em um material sujeito a condições que reduzam tensões e deformações repetidas em determinado ponto ou pontos e que possa culminar em trincas ou completa ruptura após um determinado número de repetições.

Tighe *et al.* (2003), muitos países estão direcionando mais seus estudos para medidas de correção, manutenção e restauração de rodovias do que para as novas construções, visando estratégias custo-benefício. Em grande parte, os trabalhos científicos de medidas de restauração, tratam-se de estudos sobre recapeamentos asfálticos, incluindo o Programa de Pesquisas Rodoviárias do Canadá (C-SHRP), com o objetivo geral de aumentar a vida de serviço e a serventia dos pavimentos, tendo como foco principal, o trincamento das camadas de reforço.

Rodrigues (1991) descreve que o comportamento da trinca pode ser representado por 3 movimentos cinemáticos independentes, baseado na mecânica da fratura, em função dos modos de deslocamentos relativos das superfícies da trinca. Os modos de trincamentos são considerados necessários e suficientes para descrever os modos possíveis de comportamento da trinca, que são:

- Modo I: Abertura – as 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.

A Figura 2.1 mostra os modos de fraturas definidos por Rodrigues (1991).

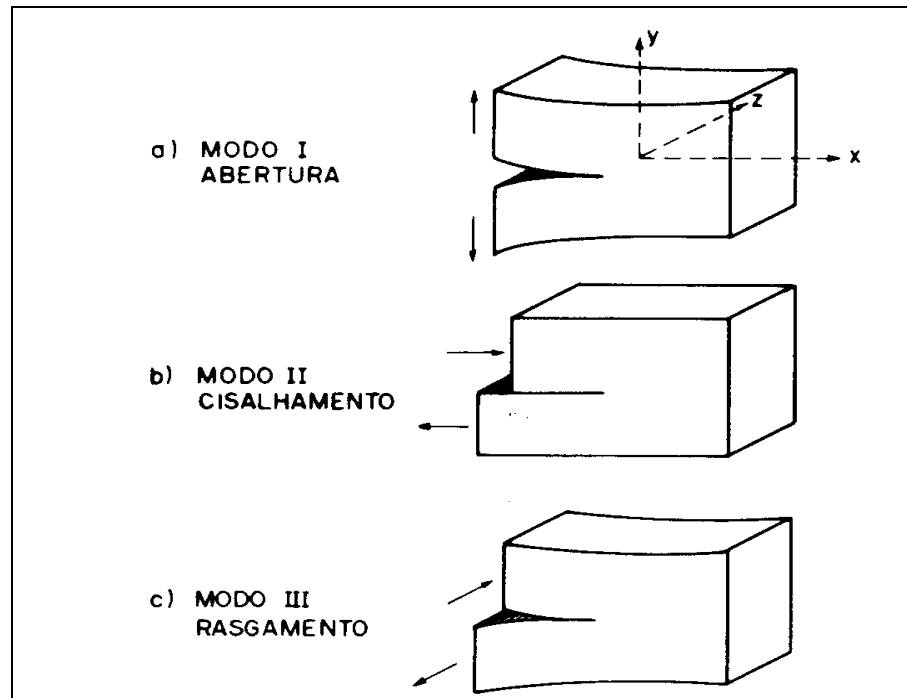


Figura 2.1: Modos de faturas definidas por Rodrigues (1991)

Segundo Molenaar (1993) e Gerritsen et al. (1992), é provável que as trincas longitudinais nas trilhas de roda sejam originadas pelas cargas de tráfego. Sustentam que os esforços cisalhantes horizontais que ocorrem abaixo dos pneus parados ou em movimento são responsáveis pelas elevadas tensão de tração e de deformação de extensão na superfície do pavimento que atua perpendicularmente à direção de movimento da roda. Essas tensões ocorrem próximas à extremidade do pneumático e produzem fissuras longitudinais.

O aparecimento de trincas na superfície de um pavimento traz conseqüências prejudiciais ao desempenho estrutural e funcional da rodovia, como:

- Concentração de esforços nos bordos da trinca;
- Perda de impermeabilização da superfície;
- Maiores deformações da estrutura do pavimento;
- Degradação do revestimento próximo à trinca.

A Norma DNER-TER 01-78 define trinca como fenda com abertura superior à fissura, podendo apresentar-se sob forma de trincas isoladas (curta ou longa, transversal ou longitudinal) ou interligadas.

Oda (2000), descreve que a aplicação do ligante asfalto-borracha tem sido feito em diversos serviços de pavimentação, como selagem de trincas, tratamentos superficiais, camadas intermediárias entre o pavimento existente e a camada de reforço e em concreto asfáltico usinado à quente. Apesar da ocorrência de defeitos na superfície de rolamento, de uma maneira geral os resultados são positivos. Em estudos realizados no Texas (EUA), descritos por Estakhri (1992), os principais defeitos relatados são a exsudação e as trincas por contração de origem térmica, associados à dosagem inadequada do teor de asfalto-borracha.

Na norma DNER-ES-128/83 a definição de trinca é feita exclusivamente em função da abertura da mesma, sendo admitidas três classes, quanto a sua severidade, no Quadro 2.3, tais como:

Quadro 2.3: Abertura da trinca

Classificação da trinca	Abertura da trinca (mm)	Observação
Classe 1	$\leq 1$	Designadas como fissuras
Classe 2	$> 1$	Sem desintegração
Classe 3	$> 1$	Com desintegração

Brown *et al.* (1987) analisaram o efeito do trincamento na redução da rigidez aparente da camada. O conceito de redução de rigidez com o tráfego permite definir ruptura e assumindo que a mesma ocorre quando a rigidez inicial é a metade.

Gonçalves (2002) diz que o trincamento verificado em revestimentos asfálticos pode ser devido a vários fatores. Os fatores que influenciam a vida de fadiga de misturas asfálticas estão apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4: Fatores que influenciam a vida de fadiga de misturas asfálticas

Fatores da mistura	Fatores de carga	Fatores ambientais
<ul style="list-style-type: none"> <li>* tipo de cimento asfáltico</li> <li>* teor de asfalto</li> <li>* temperatura na mistura</li> <li>* temperatura na compactação</li> <li>* método de compactação</li> <li>* tipo, forma, granulometria e textura do agregado</li> <li>* volume de vazios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* magnitude do carregamento</li> <li>* tipo de carregamento</li> <li>* frequência</li> <li>* histórico de tensões</li> <li>* forma do carregamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* temperatura</li> <li>* umidade</li> </ul>

(Gonçalves,2002)

## 2.2 REFLEXÃO DE TRINCAS

O fenômeno de reflexão de trincas pode ser definido como uma propagação de trincas, a partir de uma superfície degradada, isto é, um pavimento antigo, através de uma nova camada (recapeamento).

Em pavimentos severamente trincados, a ocorrência de reflexão de trincas através da camada de recapeamento asfáltico é tão mais rápida quanto maior for a espessura e maior rigidez do revestimento existente e quanto maior for a abertura das trincas.

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

Segundo Rodrigues (1991), considera-se o fenômeno de reflexão de trincas como um processo normal de trincamento por fadiga, na qual ocorre um crescimento na interligação das microfissuras da massa asfáltica, devido à repetição dos ciclos de carga em uma região enfraquecida. O autor relata também que, em geral, os movimentos causadores de reflexão de

trincas são os deslocamentos verticais diferenciais entre as paredes de uma trinca na passagem da carga de roda, ocorrendo deformações cisalhantes na camada de recapeamento, e os movimentos horizontais de abertura e fechamento da trinca devido aos ciclos térmicos, ou a expansão e retração do solo do subleito, sob a variação de umidade.

Segundo Dempsey (2002), a reflexão de trincas em recapeamento de concreto asfáltico não somente permite que a água percole para dentro da estrutura do pavimento e danifique a sub-base, mas também contribui para a rápida deterioração do pavimento.

Elseifi & Al-Qadi (2003), em muitos países, a reflexão de trincas é um dos maiores problemas a serem resolvidos no momento da restauração de rodovias. O trincamento pode levar a deterioração prematura do pavimento devido à infiltração de umidade e impurezas em sua estrutura.

Rodrigues (1991) diz que, além das cargas do tráfego, as quais são combinações dos movimentos do tipo Modos I e II, e eventualmente o Modo II, quando a trinca não é normal ao sentido das cargas de tráfego, os efeitos térmicos também contribuem para a reflexão de trincas. Os deslocamentos nas superfícies da trinca, gerados por variações térmicas, normalmente são do Modo I, pois as tensões geradas são normais ao plano de trinca.

O mecanismo de reflexões de trincas é um mistura dos Modos I e II de fratura, segundo Kim *et al.* (2002). Ao ser aplicada uma carga de roda sobre um pavimento, tensões de tração são criadas na fibra inferior camada asfáltica (Modo I), gerando também uma tensão cisalhante na direção perpendicular à face inferior desta camada, quando a carga se movimenta através da trinca (Modo II), sendo que esse movimento é acompanhado de retrações em função de baixas temperaturas.

De acordo com diversos autores, a aceleração do processo de reflexão de trincas é devido a vários fatores, tais como:

- Aumento da espessura da área trincada;
- Aumento da severidade das trincas adjacentes;
- O tráfego atuante se torna mais pesado;
- Aumento da rigidez da camada adjacente;

- Diminuição da ductibilidade do ligante asfáltico;
- Diminuição da espessura da camada de recapeamento.

## 2.3 ASFALTO-BORRACHA

A incorporação de borracha de pneus inservíveis em revestimentos asfálticos de pavimentos rodoviários e urbanos têm sido empregada há algumas décadas no exterior.

Pesquisas e aplicações de numerosas técnicas utilizando asfalto borracha são uma realidade incontestável nos estados americanos do Arizona, Califórnia e Flórida.

Historicamente, o asfalto-borracha começou na década de 40, quando a Companhia de Reciclagem de Borracha, U.S. *Rubber Reclaiming Company*, introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada denominada *Ramflex<sup>TM</sup>*.

Charles H. MacDonald, considerado o pai do Asfalto-borracha nos Estados Unidos, em 1963 desenvolveu um material altamente elástico para ser utilizado na manutenção de pavimentos asfálticos. O produto era composto de ligante asfáltico e 25% de borracha moída de pneu (de 0,6 a 1,2 mm), misturados a 190° C durante vinte minutos, para ser utilizado em remendos, conhecidos como “band-aid”.

A modificação ou melhoria dos ligantes asfálticos utilizados em pavimentação, com adição de borracha de pneus, é considerada uma alternativa atraente para o melhoramento das propriedades dos materiais betuminosos, já que o resultado final é um revestimento com características técnicas superiores às verificadas em misturas asfálticas convencionais.

A borracha constituinte do pneu possui excelentes propriedades físico-químicas para ser incorporada ao ligante convencional, trazendo uma série de melhorias que se refletem diretamente na durabilidade do pavimento, a saber: a incorporação de agentes antioxidantes e inibidores da ação de raios ultravioleta que diminuem, sensivelmente, o envelhecimento do CAP, o aumento da resistência à ação química de óleos e combustíveis, a diminuição da suscetibilidade térmica, o aumento da deformação de tração admissível (melhorando o



comportamento à fadiga), aumento da deformação elástica instantânea e a diminuição da deformação permanente (ângulo de defasagem).

As formas mais empregadas de adição da borracha de pneus às misturas asfálticas são:

- Via Seca: a borracha é introduzida diretamente no misturador da usina de asfalto. Neste caso a borracha entra como um agregado na mistura. A transferência de propriedades importantes da borracha ao ligante é prejudicada, embora seja possível agregar melhorias à mistura asfáltica, desde que na sua fabricação seja possível obter uma mistura homogênea;
- Via Úmida: a borracha é previamente misturada ao ligante, modificando-o permanentemente. Nesta modalidade ocorre a transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original.

O problema de compatibilidade entre o tipo de polímero modificador, inclusive a borracha moída de pneu e o ligante tradicional, deve ser mencionado. Normalmente em nosso País, o ligante tradicional precisa ser compatibilizado para receber a borracha moída de pneu. A característica de compatibilidade ou estabilidade de um ligante modificado requer que, o asfalto base utilizado como matéria prima possua uma relação asfaltenos/aromáticos dentro de uma determinada faixa. Se o ligante base não possuir esta compatibilidade com a borracha moída de pneu, ele deve ser preparado por meio de adição de insumos especiais, para somente depois receber a borracha moída de pneu.

Specht (2004) cita os fatores que influenciam o desempenho de cada camada asfáltica:

- Características dos materiais utilizados;
- Dosagem;
- Condições de compactação;
- Processo construtivo;
- Plano de manutenção e restauração.

Segundo Zanzotto & Svec (1996) e Asphalt Rubber Pavement Association, o ligante modificado por borracha granulada de pneus ou simplesmente asfalto-borracha, apresenta as seguintes características:

- Redução da suscetibilidade térmica: misturas com ligante asfalto borracha são mais resistentes às variações de temperatura, ou seja, o seu desempenho tanto a altas como a baixas temperaturas é melhor quando comparado com pavimentos construídos com ligante convencional;
- Aumento da flexibilidade, devido a maior concentração de elastômeros na borracha de pneus;
- Melhor adesividade aos agregados;
- Aumento da vida útil do pavimento;
- Maior resistência ao envelhecimento: a presença de antioxidantes e carbono na borracha de pneus auxiliam na redução do envelhecimento por oxidação;
- Maior resistência à propagação de trincas e a formação de trilhas de roda;
- Permite a redução da espessura do pavimento;
- Proporciona melhor aderência pneu-pavimento;
- Redução do ruído provocado pelo tráfego entre 65 e 85%.

O processo úmido é o que dá origem ao ligante denominado asfalto-borracha, definido pela ASTM D 6114-97 como “uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada e certos aditivos, dos quais o percentual de borracha deve ser pelo menos 15% em peso do total da mistura e sofrer reação com ligante asfáltico aquecido da forma a causar um inchamento das partículas de borracha”.

Segundo Oda (2000), quando comparado com ligante convencional, pode verificar-se que a quantidade de asfalto-borracha necessária para uma determinada mistura é maior, o que justifica o problema de exsudação, mas ao mesmo tempo proporciona uma maior durabilidade à mistura asfáltica. Sem dúvida esta é uma excelente alternativa para a redução do grave problema ambiental, mas ainda existem obstáculos ao emprego dessa tecnologia,

principalmente de origem econômica, pois a trituração de pneus representa um custo relativamente alto.

Epps (1994) revisou o estado-da-prática da utilização de resíduos de pneus na engenharia rodoviária e da aplicação do pó em misturas asfálticas traçando as seguintes considerações a respeito das propriedades da mistura:

- Estabilidade e fluência: com relação ao projeto da mistura seguindo a metodologia Marshall, os valores de estabilidade podem ser reduzido e de fluência aumentados;
- Módulo de resiliência e resistência à tração: os valores de módulo de resiliência e a resistência à tração podem aumentar ou diminuir, dependendo das condições particulares da mistura (granulometria dos agregados, % borracha etc);
- Deformação permanente: não há consenso a respeito do efeito da borracha na deformação permanente, há experiência positivas;
- Fadiga: a vida de fadiga é melhorada quando o farelo de borracha é adicionado às misturas asfálticas;
- Trincamento térmico: há um aumento na resistência ao trincamento térmico. As características da mistura tem papel importante neste aspecto do comportamento em serviço;
- Abrasão superficial: no estado da Califórnia é reportado melhoramento nas características de resistência à abrasão superficial;
- Susceptibilidade à água: a susceptibilidade à água pode ser um problema quando a borracha é adicionada à mistura;
- Atrito: em geral a presença de borracha reduz o atrito.

Segundo Specht (2004), a adição de 12 a 18% de borracha no ligante, leva a produção de misturas com maior resistência:

- A fratura;
- A deformações permanentes;

- Maior durabilidade.

## 2.4 EXPERIMENTOS REALIZADOS COM SIMULADORES DE TRÁFEGO

Os ensaios em verdadeira grandeza permitem que os resultados dos experimentos possam ser generalizados e aplicados em outras condições de tráfego.

Para o entendimento do mecanismo de degradação do pavimento, é preciso estabelecer uma relação entre os números e a magnitude das cargas aplicadas, e os danos por elas causados no pavimento.

Os ensaios acelerados são ferramentas eficazes na previsão de desempenho de pavimentos, porém, deve-se ressaltar que a velocidade do carregamento dinâmico imposto por grande parte dos simuladores de tráfego é menor que as velocidades reais do tráfego.

Em 1912, foi utilizada pela primeira vez a técnica de ensaios acelerados, quando foi construída a *Teddington Testing Machine*, na Nacional *Physical Laboratory* do Reino Unido. Este precursor dos simuladores de tráfego possuía 8 braços radiais, com rodas em suas extremidades, que aplicavam as cargas até 13 kN. Este equipamento possibilitava a aplicação de 80.000 passadas em 24 horas, com trajetórias circulares, relatado por Núñez (1997).

Núñez (1997) relatou que, um marco da análise experimental de pavimentos se deu do final dos anos 40 quando foram realizados nos Estados Unidos três grandes ensaios sob condições controladas:

- O primeiro destes experimentos foi de “*Maryland Road Test*” que objetivava determinar os efeitos relativos de níveis diferentes de carregamento em um pavimento de concreto. Foi realizado em um trecho rodoviário com aproximadamente 2 km de extensão, construído no estado de Maryland em 1941;
- O segundo experimento ficou conhecido por Washo Road Test e teve os mesmos objetivos do primeiro, onde foram construídas 2 pistas idênticas apresentando diversas combinações de espessuras de misturas asfálticas a quente e de bases granulares. Segundo Huang (1993) este experimentos destacaram-se os resultados: o estabelecimento de equivalência entre eixos simples e tandem, tanto em termos de

degradação quanto em termos de deflexões; a observação de que a pavimentação do acostamento retardava a degradação da trilha de roda externa das seções experimentais; e as deflexões dos pavimentos eram influenciadas pela velocidade do veículo, pelo carregamento e pelo teor de umidade das camadas superiores do subleito;

- Em 1956 iniciou-se a construção das instalações experimentais da AASHO em Ottawa. O principal objetivo do AASHO *Road Test* era determinar uma relação significativa entre o número de repetições de eixo, com cargas diferentes em magnitudes e arranjos, e o desempenho de pavimentos constituídos por camadas de natureza e espessura variada.

Núñez (1997) também destacou o papel das Conferências Internacionais sobre o Pavimento Asfáltico, conhecida como *Conferências Ann Arbor*, na divulgação de ensaios acelerados de pavimentos, com o emprego de simuladores de tráfego radiais ou lineares.

Brown e Brodrick (1999) relataram os resultados obtidos nos estudos envolvendo ensaios acelerados de pavimentos desenvolvidos ao longo de 25 anos em Nottingham, na Inglaterra. Também apresentaram um histórico acerca da utilização do simulador de tráfego na Inglaterra desde a construção da primeira máquina projetada para provocar a deterioração acelerada dos pavimentos, no ano de 1912 no antigo National *Physical Laboratory*.

Estudo publicado no *Journal of Transportation Engineering*, sobre o efeito da distribuição de pressões de contato nos parâmetros de respostas do pavimento, verificou que a magnitude das deformações, na fibra inferior da camada asfáltica e as deformações no topo da camada de subleito, tanto para pavimentos delgados como para pavimentos espessos (revestidos de 15 a 25 cm de concreto asfáltico, respectivamente), são afetados com um decréscimo em mais de 25 %, nos dois casos, quando a velocidade veicular aumenta de 5 para 110 km/h. Neste artigo é relatado um estudo realizado na década de 50, pela *Western Association of state Highway Officials*, constatando a redução no nível de deflexões do pavimento com o aumento da velocidade (Siddarthan et al, 2002).

### **2.4.1 Síntese das principais contribuições recentes dos ensaios acelerados em pavimentos**

Metcalf (1996) relata que por muitos anos, engenheiros de pavimentação têm usado com sucesso os ensaios acelerados em escala real para o desenvolvimento e verificação de projetos e avaliação do desempenho de materiais e projetos.

Em um relato da pesquisa CAL/APT, realizada em conjunto pelo Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans) e a Universidade da Califórnia em Berkeley, Harvey et al. (2000) discutem estratégias de recuperação de pavimentos ensaiados até a ruptura, com emprego de simulador de tráfego tipo HVS. Várias seções experimentais receberam recapeamentos constituídos por concreto asfáltico de graduação densa (DGAC) ou por misturas asfálticas a quente, tipo “gap graded”, com ligante modificado por borracha (ARHM-GG). O estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o método para dimensionamento de recapeamentos da Caltrans. Ensaios acelerados realizados com o HVS confirmaram que o emprego de misturas com asfalto modificado por borracha reduz à metade a espessura necessária de recapeamento (37 mm ao invés de 75 mm) sobre pavimentos apresentando trincamento por fadiga. No relatório da pesquisa CAL/APT enfatiza-se a importância de que nesse tipo de estudo (reflexão de trincas em pavimentos submetidos a ensaios acelerados) se evite a formação de afundamentos nas trilhas de rodas decorrentes de redução volumétrica e/ou cisalhamento das camadas inferiores (constituídas por solos e/ou agregados) do pavimento ou do subleito.

Nokes *et al.* (1996) relatou um planejamento de programas de ensaios acelerados de pavimentos CAL/ APT do Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans). Após a realização de um programa piloto de teste em uma pista experimental da África do Sul, concluiu-se que o caminho mais adequado para investigação do desempenho em pavimentos em escala real na Califórnia seria a utilização do HVS.

Horak *et al.* (1999) diz em que a realização de ensaios acelerados em estruturas de pavimentos vem sendo cada vez mais aceita como uma importante ferramenta para o processo de decisão e investigação da adaptação de procedimentos para o projeto de pavimentos. Na África do Sul, a utilização do HVS tem permitido avanços significativos no conhecimento acerca do comportamento dos materiais locais e para uso em estruturas de pavimentos. Os estudos realizados também refletem a importância e tem possibilitado a incorporação de

variáveis ambientais na modelagem do comportamento dos pavimentos em serviço. O sistema HVS provou ser uma ferramenta sem similar para o estabelecimento de conclusões acerca de relações benefício/ custo de estratégias de pavimentos. Um aspecto importante é o fato do HVS ter permitido uma integração clara e benéfica entre pesquisadores, empreiteiros e os responsáveis pela administração do sistema viário sul-africano, auxiliando na transferência de tecnologia. O HVS da África do Sul provocou ser um elemento adequado para promover interação entre profissionais que atuam em atividades complementares de pesquisa e prática rodoviária.

No Brasil, a Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, realiza-se experimentos, que alguns destes experimentos estão citados abaixo. Esta área situa-se na cidade de Porto Alegre no Rio Grande do Sul.

Em 1996 foram construídas 2 pistas experimentais com 20 m de comprimento e 3,5 m de largura e um prédio para controle das operações, processamento de informações e armazenamento das informações e equipamentos.

No final de 2000 foi construído também nesta área um laboratório para execução de ensaios em misturas asfálticas.

A primeira pesquisa realizada na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos foi Núñez (1997) que analisou o comportamento mecânico de pavimentos delgados em bases constituídas de basaltos alterados.

Albano (1998), estudou os efeitos das alterações da carga máxima legal por eixo, pressão e inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento delgado.

Viera (2002), estudou o desempenho de um pavimento flexível solicitado por um simulador de tráfego. Esta pesquisa teve os seguintes objetivos:

- Reproduziu de maneira acelerada, os mecanismos de degradação que ocorreram em pavimentos flexíveis, através de solicitação em uma pista experimental construída na área citada acima, empregando o simulador de tráfego UFRGS/ DAER-RS;
- Acompanhar a evolução de degradação do pavimento com o intuito de se fazer uma comparação entre o desempenho de recapeamentos executados diretamente sobre uma

camada trincada e com o uso de camada intermediária (geotexteis impregnados com asfaltos);

- Estudar o comportamento, do ponto de vista estrutural e funcional, de um pavimento com um revestimento de concreto asfáltico através de medições deflectométricas, deformações permanentes e degradações superficiais.

Gonçalves (2002) estudou o desempenho do pavimento flexível a partir da instrumentação e ensaios acelerados. Esta pesquisa teve o objetivo de analisar os resultados derivados da instrumentação instalada em pistas experimentais de pavimentos flexíveis e investigar aspectos relativos ao desempenho estrutural sob tráfego dessas seções, visando trazer subsídios para a estruturação de modelos de previsão de desempenho.

Dentre vários estudos realizados recentemente nesta área, destacam-se Azambuja (2004) que analisou recapeamentos asfálticos através de ensaios acelerados. Esta pesquisa teve o intuito de avaliar o comportamento estrutural e funcional das estruturas em questão, durante a solicitação do pavimento pelo simulador de tráfego, o monitoramento de parâmetros estruturais, comportamento, textura de superfície e ambientais.

Posteriormente, Cruz (2005) apresentou resultados de desempenho de recapeamento em concreto asfáltico convencional como camada retardadora de reflexão de trincas. No estudo de Cruz (2005) deu-se também início à solicitação de um recapeamento em asfalto-borracha cuja continuidade é analisada nesta dissertação.



### 3 CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 ESTRUTURA DO PAVIMENTO SOLICITADO

A pista experimental utilizada neste trabalho foi executada em setembro de 2000, no trabalho de Gonçalves (2002), que teve o objetivo de analisar o desempenho de pavimentos asfálticos através da instrumentação instalada em duas pistas, visando trazer subsídios para a estruturação de modelos de previsão de desempenho. Dentre as pistas solicitadas por Gonçalves (2002), a pista estudada nesta pesquisa é a “Pista 4”.

Gonçalves (2002) relata que foi instalado um sistema de drenagem na pista experimental durante a execução desta, com o objetivo de evitar a ocorrência de alterações significativas nas condições de umidade nas camadas de base e de reforço do subleito. Este sistema de drenagem é constituído de uma vala com 1,0 m de largura e 1,5 m de profundidade, em brita graduada, encapsulada com manta geotêxtil.

A estrutura do pavimento estudada por Gonçalves (2002) é composta por camada final de terraplenagem (CFT) constituída de uma argila arenosa de comportamento laterítico com 50 cm de espessura, base de brita graduada com 30 cm de espessura e concreto asfáltico com espessura de 4 cm.

Após a pesquisa de Gonçalves (2002), deu-se início ao estudo de eficiência de diversos procedimentos retardadores de reflexão de trincas. Nesse contexto, Azambuja (2004) realizou um estudo com recapeamento em concreto asfáltico convencional e tratamento superficial com polímeros. Cruz (2005) comparou a reflexão de trincas em recapeamentos em concretos asfálticos convencional e com ligante modificado por adição de borracha vulcanizada.

Os recapeamentos estudados na pesquisa de Cruz (2005) foram executados sobre a antiga pista 4 do estudo de Gonçalves (2002). Cruz (2005) analisou resultados obtidos através da aplicação de aproximadamente 98.000 ciclos de carga de eixo de 100 kN no recapeamento em concreto asfáltico convencional e de mais de 123.000 ciclos de idêntica magnitude no recapeamento com concreto asfáltico modificado com borracha. Enquanto que no recapeamento convencional registrou-se intenso trincamento, no recapeamento com asfalto

modificado apenas uma trinca foi observada até o final do ensaio, impedindo comparar as eficiências dos recapeamentos. Assim, na pesquisa relatada nesta dissertação, continuou-se a solicitação no recapeamento em concreto asfáltico modificado com borracha, estudado por Cruz (2005) de forma a permitir quantificar o acréscimo na vida útil da nova capa asfáltica, resultante da modificação de ligante CAP 20 com a incorporação da borracha vulcanizada.

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente a estrutura solicitada inicialmente por Cruz (2005) e posteriormente por esta pesquisa. Observa-se que o recapeamento em concreto asfáltico convencional estudado por Cruz (2005) só difere do apresentado na Figura 3.1, na natureza do ligante usado no recapeamento (ou seja, ligante convencional CAP 20).

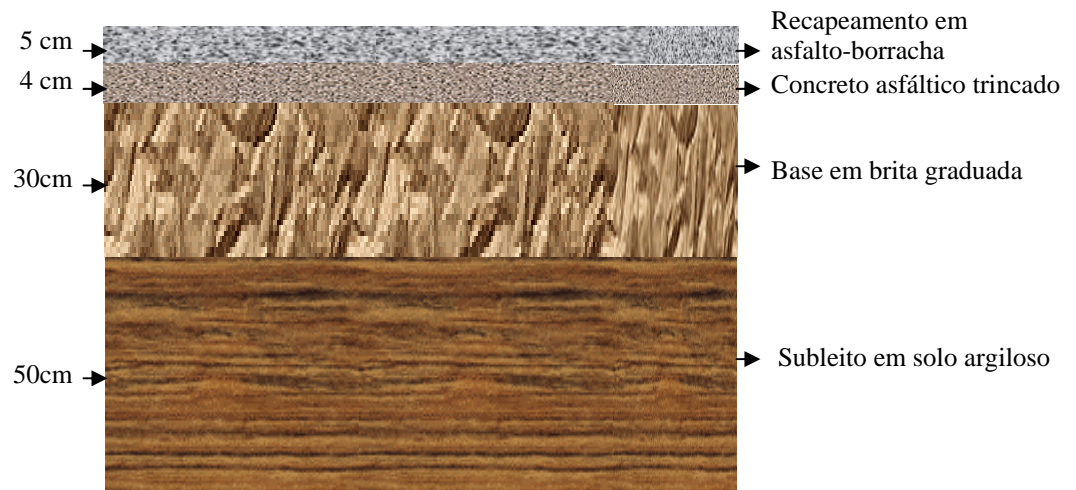


Figura 3.1: Estrutura do pavimento ensaiado

### 3.1.1 Características da camada final de terraplenagem (CFT) e dos materiais granulares

Segundo Gonçalves (2002), os materiais das camadas do pavimento ensaiado foram selecionados a partir da identificação daqueles representativos das obras rodoviárias executadas para níveis de tráfego significativo no Estado do Rio Grande do Sul. Primeiramente, foram realizados estudos de laboratório com vistas à caracterização dos materiais a serem utilizados.

As principais características do solo argiloso da camada final de terraplenagem e da brita da base granular estão demonstradas nos Quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3.1: Propriedades do solo argiloso utilizado como camada final de terraplenagem

Propriedades do Solo	Valor
Fração argilosa (%)	24
Limite de liquidez (%)	42
Limite de plasticidade (%)	26
Índice de plasticidade (%)	16
Densidade real dos grãos	2,85
Teor de umidade ótimo (%)	22,7
Peso específico aparente seco máximo (kN/ m <sup>3</sup> )	16,3
Classificação USC	CL
Classificação HRB	A-7-6
Classificação MCT	LG`
Expansão (%)	0,19

(Fonte: Núñez 1997)

Quadro 3.2: Propriedades da brita graduada utilizada como base

Propriedade	Valor
Teor de umidade ótimo (%)	8,7
Densidade aparente	2,392
% que passa na peneira 200	4,3
Equivalente de areia (%)	> 50
Índice de lamelaridade (%)	< 40
Absorção (%)	1,20
Diâmetro Máximo (mm)	19,5

(Fonte: Gonçalves, 2002)

### 3.1.2 Caracterização da Mistura Asfáltica

A composição dos materiais utilizados na mistura asfáltica com adição de borracha está apresentadas nos Quadros 3.3, 3.4 e 3.5.

A dosagem da mistura asfáltica foi feita através do Método Marshall, adotando-se uma curva granulométrica enquadrada na Faixa B da especificação ESP-16/91, do DAER/RS.

O Grupo Grega Asfaltos comercializa em nosso País e em função do tipo de aplicação, dois tipos de asfalto-borracha o tipo A com 20 % de borracha e o tipo B com 15 % de borracha. O ligante Ecoflex A é de alta viscosidade e o ligante Ecoflex B de viscosidade média.

Na pesquisa de Cruz (2005) foi utilizado o ligante Ecoflex B que é um ligante de média viscosidade, embora seja mais viscoso que os cimentos asfálticos de petróleo tradicionais. Na sua constituição apresenta um teor de borracha granulada de pneus entre 12 % e 17 %, e se destina basicamente a ser aplicado em misturas asfálticas densas contínuas, do tipo faixa C do DNER.

Quadro 3.3: Composição granulométrica dos agregados

Peneiras	Mistura com asfalto-borracha	
	Mat. Ret. (g)	% Pass
¾"		100
½"	71,0	90,6
3/8"	106,5	85,9
Nº 4	282,4	62,7
Nº 8	442,1	41,6
Nº 30	600,0	20,7
Nº 50	646,4	14,6
Nº 100	682,5	9,8
Nº 200	717,3	5,1

(Fonte: Grupo Grega Asfaltos, 2003)

Quadro 3.4: Parâmetros Marshall da mistura asfáltica com asfalto-borracha

DNER- ME 043/95		Mínimo	Máximo
Teor de ligante (%)	6,7	6,4	7,0
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,456	-	-
V <sub>v</sub> (%)	4,4	4,0	5,0
RBV (%)	77,9	75,0	82,0
Estabilidade (kN)	1607	500	-
Fluência (mm)	6,43	2,0	4,0
VAM (%)	19,89	15,0	-
Resistência à tração (kPa)	1.573	-	-

(Fonte: Grupa Greca Asfaltos, 2003)

O ligante modificado (Ecoflex B) apresenta propriedades e relações físico-químicas diferentes do ligante original, mostrada no Quadro 3.5.

Quadro 3.5: Propriedades do ligante modificado (Ecoflex B)

Ensaio	Unidade	Norma	Requisito	Ecoflex B
Viscosidade Brookfield, 175° C	cP	ASTM D 2196	Mínimo	800
			Máximo	2500
Penetração (100 g, 5 s, 25° C)	0,10 mm	ASTM D5	Mínimo	25
			Máximo	75
Recuperação elástica por torção	%	NLD 329/91	Mínimo	50
Ponto de amolecimento	° C	ASTM D 36	Mínimo	55
Ponto de fulgor	° C	ASTM D 93	Mínimo	235

(fonte: Grupo Greca Asfaltos, 2005)

Quadro 3.6: Características dos ligantes asfálticos utilizados nas misturas

Características	Normas	Ligante modificado pela adição de borracha (Ecoflex B)	Ligante convencional CAP 20
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	52	47,5
Penetração (25°C,5s,100g) (0,1 mm)	ASTM D 5	60	56,5
Recuperação Elástica (%)	DNER – ME 382/99	30	-
Viscosidade Brookfield * (cP) a 135°C a 155°C a 175°C	ASTM D 4402	(*) 1265 (*) 495 (*) 265	(*) 331,0 (*) 137,5 (*) 66,0
Viscosidade Brookfield a 175° (cP)	ASTM D 2196	935	-
RTFOT Perda de massa (%)	ASTM D	0,96	0,31
ANÁLISES APÓS RTFOT			
Penetração (25°C,5s,100g) (0,1 mm)	ASTM D 5	35	36,3
Recuperação Elástica (%)	DNER – ME 382/99	63	-
Viscosidade Brookfield (cP) a 135°C a 155°C a 175°C	ASTM D 4402	(**) 3285 (**) 1190 (**) 472	(*) 517,5 (*) 197,0 (*) 92,0
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	61,5	51,2

(Fonte: Grega Asfaltos, 2003)

Nota:

(\*) spindle 21 20 rpm 5 minutos a 135°C

(\*) spindle 21 50 rpm 5 minutos a 155°C

(\*) spindle 21 100 rpm 5 minutos a 175°C

(\*\*) spindle 21 10 rpm 5 minutos a 135°C

(\*\*) spindle 21 20 rpm 5 minutos a 155°C

(\*\*) spindle 21 50 rpm 5 minutos a 175°C

### 3.2 EXECUÇÃO DO PAVIMENTO EXPERIMENTAL

A pista experimental com 16,2 m de comprimento e 3,20 m de largura foi dividida em duas faixas longitudinais, executando-se um tipo de recapeamento em cada faixa, ou seja, uma faixa com recapeamento de asfalto convencional e outra faixa com asfalto-borracha.

Em cada faixa longitudinal foram definidas 7 áreas, sendo que 4 destas áreas (AT1, AT3, AT5 e AT7) foram trincadas, como mostra a Figura 3.2. Cada área destas apresenta um formato retangular medindo 1,20 m x 0,80 m, e cada um destes retângulos foram subdivididos em quadrados de 10 cm de lado, de acordo com a Figura 3.3. As três áreas restantes (ANT2, ANT4 e ANT6) não foram trincadas e possuem também um formato retangular que mede 1,10 m x 0,80 m.

As trincas produzidas através de uma serra circular apresentam 4 cm de profundidade, com o objetivo de atingir um estado acentuado de degradação do pavimento.

As juntas foram preenchidas com argila, para que não ocorresse o selamento das mesmas durante a aplicação da pintura asfáltica, possibilitando assim o estudo da reflexão de trincas.

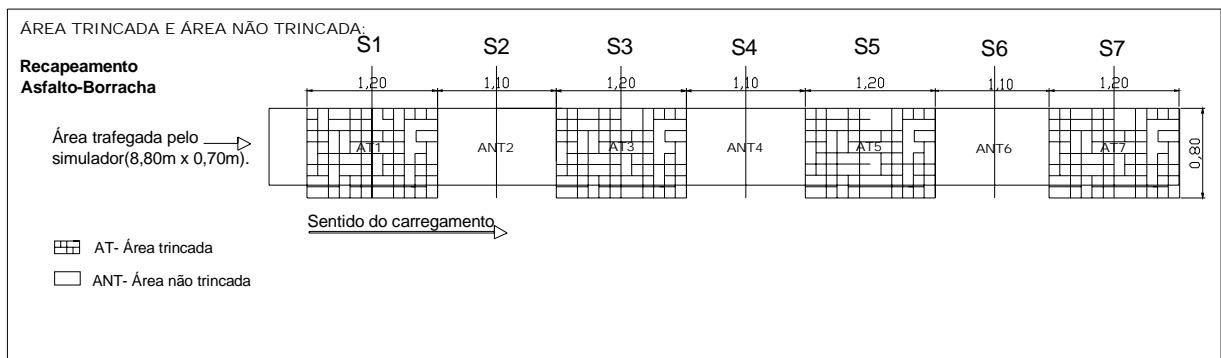


Figura 3.2: Pista experimental com a localização das AT e ANT

Entre o pavimento trincado e o recapeamento foram instalados sensores que possibilitam a medição de deformação, pressão e temperatura no interior da estrutura. Foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Sensor de temperatura;

- Extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*);
- Células de tensão total.

A instrumentação de estruturas de pavimentos *in situ* tem como finalidade a obtenção de subsídios que possibilitem explicar racionalmente o desempenho oferecido pelo pavimento ao longo da sua vida de serviço.

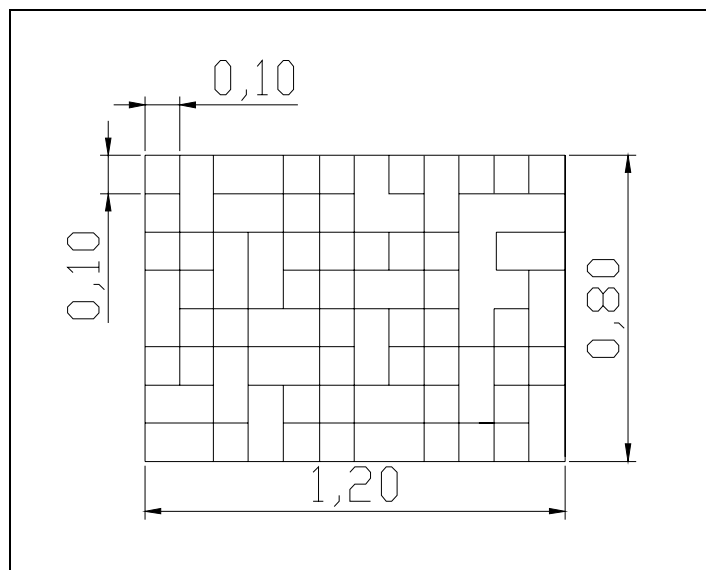


Figura 3.3: Trincamento padrão imposto ao pavimento experimental

Na faixa do recapeamento em asfalto-borracha do pavimento foi instalado um conjunto de sensores nas áreas AT3 e AT5 da pista, mostrada na Figura 3.4. Para facilitar a instalação e fixação, os sensores foram colocados nas fendas do trincamento artificial, de maneira cuidadosa, para que não ocorresse danificação dos mesmos. Foram feitos sulcos na camada de asfalto-borracha para que a face sensível a medições ficasse exposta para receber a camada de recapeamento. Foram instalados *strain gages*, células de tensão total para a verificação das tensões em direção horizontal e vertical e um sensor de temperatura.

Mesmo assim, tomando todos os cuidados necessários com o conjunto de sensores, eles não resistiram até o final do trabalho experimental.



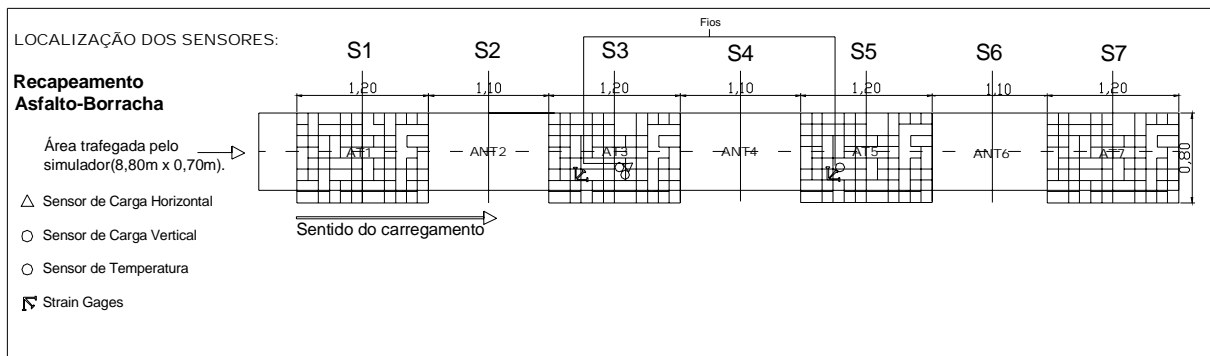


Figura 3.4: Localização dos sensores na pista experimental

### 3.3 EXECUÇÃO DO RECAPEAMENTO

Sobre o revestimento trincado, foi aplicada uma pintura com emulsão asfáltica, apresentando a superfície uma temperatura de aproximadamente 26,5 °C. Posteriormente, foi executado sobre a estrutura um recapeamento constituído por concreto asfáltico com ligante modificado por borracha de 5 cm de espessura.

O Quadro 3.7 apresenta as informações relativas à execução do recapeamento em asfalto-borracha.

Quadro 3.7: Informações relacionadas ao recapeamento em asfalto-borracha

	Asfalto-Borracha
Horário de execução do recapeamento	16h
Temperatura da massa no caminhão	165 °C
Ligante utilizado	Ecoflex B
Temperatura de aplicação	158 °C
Espessura inicial	5,2 cm
Rolo pneumático liso, 18 tf para confinamento da massa	2 passadas
Rolo liso de 10 tf sem vibração para compactação	53 passadas
Temperatura de compactação	155 °C
Espessura final	4 cm
Percentual de borracha no ligante	15%

(Fonte: Cruz, 2005)

Durante a execução dos recapeamentos em asfalto convencional e em asfalto-borracha para o estudo de Cruz (2005) foram moldados corpos-de-prova (CPs), *in situ*, para a verificação das características de projeto das misturas asfálticas. Foram determinados, no Laboratório de Pavimentação da UFRGS, os módulos de resiliência e as resistências à tração na compressão diametral destes CPs. Os resultados destes ensaios e a análise estatística básica são apresentados na Tabela 3.1.

Observa-se na Tabela 3.1 que os módulos de resiliência dos CPs moldados *in situ* de mistura com ligante convencional (AC) foram, em média, 71% maiores que os da mistura com asfalto modificado por borracha (AB). Já a resistência à tração da mistura convencional (AC) foi apenas 12% superior à da mistura com asfalto modificado (AB). Com isso, a relação MR/RT, comumente empregada para avaliar susceptibilidade de misturas asfálticas ao trincamento por fadiga da mistura convencional (AC), resultou 52% maior que a correspondente à mistura modificada (AB). Ou seja, os corpos-de-prova da mistura com asfalto modificado por incorporação de borracha (AB), moldados em laboratório, apresentaram um comportamento menos rígido (mais dúctil) que os CPs da mistura com asfalto convencional. Isto indica que a modificação com borracha melhora as características elásticas do ligante, propiciando misturas com maior vida de fadiga e com maior potencial redutor de propagação de trincas.

Após a execução do recapeamento foram extraídos, com sonda rotativa, corpos-de-prova (CPs) com as duas camadas, revestimento antigo trincado e recapeamento. Os CPs foram extraídos ao longo de toda a extensão do segmento longitudinal. Em laboratório, as camadas foram separadas e ensaiadas para determinação dos módulos de resiliência, das resistências à tração e dos graus de compactação alcançados na pista. Os resultados e as análises básicas dos CPs extraídos do pavimento são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Módulos de resiliência e resistência à tração

Identificação dos CPs	Módulo de resiliência (MPa)	Resistência à tração (MPa)
1 (AC)	9916	1,605
2 (AC)	11055	1,599
3 (AC)	8082	1,502
4 (AC)	9398	1,599
5 (AC)	10556	1,655
6 (AC)	9322	1,491
7 (AB)	5129	1,333
8 (AB)	4989	1,498
9 (AB)	7161	1,470
10 (AB)	5407	1,415
11 (AB)	5872	1,351
12 (AB)	5533	1,371
Média (AC)	9722	1,58
Média (AB)	5682	1,41
Desvio padrão (AC)	1045	0,07
Desvio padrão (AB)	788	0,07
Coeficiente de variância (%) (AC)	10	4
Coeficiente de variância (%) (AB)	13	5

(Fonte: Cruz, 2005)

Tabela 3.2: Módulos de resiliência, resistência à tração e grau de compactação dos CPs extraídos da pista

Identificação dos CPs	Módulo de resiliência (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Grau de compactação (%)
1 (AC)	6581	0,627	93
2 (AC)	6950	0,706	92
3 (AC)	4399	0,731	93
4 (AC)	2988	0,732	94
5 (AC)	3730	0,771	95
6 (AC)	4929	0,771	94
7 (AB)	4342	0,662	91
8 (AB)	3920	0,638	92
9 (AB)	4685	0,637	94
10 (AB)	2981	0,803	96
11 (AB)	2233	0,688	94
12 (AB)	3244	0,810	96
Média (AC)	4930	0,72	94
Desvio Padrão (AC)	1568	0,053	1
Coefficiente de variância (%) (AC)	32	14	1
Média (AB)	3573	0,71	94
Desvio Padrão (AB)	922	0,08	2
Coefficiente de variância (%) (AB)	26	9	2

(Fonte: Cruz, 2005)

Observa-se, ainda, que em nenhuma das estruturas alcançou-se o Grau de Compactação mínimo de 97%. Os Graus de Compactação alcançados nos recapeamentos com ligante convencional (AC) e ligante modificado pela incorporação de borracha (AB) foram idênticos: 94%. É compreensível que a pequena extensão da pista experimental (pouco mais de 16 m), seguida por um trecho em brita (sem revestimento asfáltico) tenha dificultado a aceleração dos rolos compactadores, e com isso a obtenção de uma melhor compactação. Contudo, isto não pode ser interpretado como elemento que tenha distorcido o desempenho comparativo dos

dois recapeamentos, uma vez que, como já se afirmou, em ambos os recapeamentos alcançou-se um mesmo Grau de Compactação. Ainda vale observar que na técnica de ensaios acelerados de pavimentos, é válido (e comum) trabalhar-se com materiais (no caso misturas) enfraquecidos (no caso com uma compactação insatisfatória) de forma a obter-se resultados em curtos prazos.

## 4 CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO

Para estimar o desempenho dos pavimentos, geralmente ensaios realizados em laboratórios não são adequados, pois são feitos em escala reduzida, e este efeito modifica fatores que afastam o experimento das condições reais.

O problema da escala do experimento pode ser resolvido pela utilização de seções testes em pavimentos reais, embora este procedimento apresente como inconveniente o longo tempo necessário para que se apresentem modificações no desempenho do pavimento, devido ao volume de tráfego atuante na rodovia.

Para obter-se a degradação dos pavimentos ensaiados em períodos de tempo reduzidos, podem-se testar pequenas seções com aplicações de cargas definidas. O processo descrito acima tem sido feito através dos equipamentos conhecidos como “simuladores de tráfego”. Este equipamento tem como objetivo permitir a obtenção de dados mais reais sob condições controladas e em períodos de tempo reduzidos.

Existem 3 simuladores de tráfego no Brasil: um radial no IPR/DNER, e outro linear, o Simulador de Tráfego UFRGS/ DAER-RS e o CIFALI.

Os benefícios da utilização de ensaios acelerados em escala real são:

- Aprimoramento de procedimentos de projeto;
- Análise de configurações de pavimentos;
- Suporte de pesquisas adicionais na teoria de pavimentos rodoviários;
- Avaliação dos efeitos de diferentes configurações de carga;
- Validação do emprego de materiais existentes;
- Avaliação de materiais novos, não tradicionais ou modificados;
- Previsão da vida útil dos pavimentos;
- Ensaios de verificação de pavimentos em condições especiais.

O equipamento simulador de tráfego constitui uma ligação entre os ensaios laboratoriais e as rodovias, possibilitando uma simulação acelerada do tráfego.

O Simulador de tráfego UFRGS/ DAER- RS, utilizado na parte experimental desta pesquisa, foi projetado pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, baseado no equipamento *Accelerated Loading Facility* de origem australiana, e construído entre 1992 e 1994, pelo DAER/RS.

O equipamento foi utilizado pela primeira vez em maio de 1996, no trabalho de doutorado de Núñez (1997), mostrado na Figura 4.1. No trabalho de Núñez (1997) foram estudadas as viabilidades do uso de basaltos alterados, provenientes de jazidas do Rio Grande do Sul, como materiais de pavimentação em rodovias de baixo volume de tráfego.



Figura 4.1: Simulador de tráfego UFRGS/DAER-RS

Descrito por Núñez (1997), é um equipamento com 15 m de comprimento, 4,3 m de altura e 2,5 m de largura, e pesa aproximadamente 220 kN. Pneus com lonas, tamanho 9,0 x 20,0, estão em um semi-eixo simples com rodas duplas. O controle eletrônico dos sistemas permite ajustar a velocidade e o deslocamento transversal do rodado (a trilha das rodas pode variar até  $\pm 0,5$  m a partir do eixo de simetria do carregamento). Cargas de eixo que variam entre 82 kN e 130 kN são aplicadas hidraulicamente de 0,56 MPa a 0,73 MPa na pressão dos pneus. As

cargas de roda e a pressão dos pneus são controladas admitindo-se variações de até  $\pm 2\%$ . As rodas trafegam á velocidade de 6 km/h sobre o pavimento em uma extensão de até 9 m. Para simular o tráfego rodoviário, as cargas são aplicadas em um único sentido sobre uma trilha, seguindo uma distribuição normal.

Com o uso do equipamento simulador de tráfego é possível reduzir para alguns meses o dano que uma rodovia, com volume médio de tráfego, experimentará ao longo de sua vida de projeto, considerando-se as paradas do equipamento para a realização de medições e manutenção.

A Figura 4.2 apresenta o rodado do simulador de tráfego em cima do pavimento.



Figura 4.2: Rodado em cima do pavimento

Este equipamento é composto por diferentes sistemas, tais como:

- Sistema de guiamento do rodado: o rodado que pode ser simples ou duplo é ligado a um carro que se desloca sobre os trilhos, tracionado por um cabo de aço. Este carro possui em cada lateral 5 rodas que promovem seu alinhamento, e são dispostas de tal



forma que 3 delas servem ao guiamento sob a carga e 2 servem ao guiamento durante o retorno para reposicionamento, durante um ciclo de aplicação;

- Sistema de aplicação de carga: a carga é aplicada através de uma unidade hidráulica comandada eletricamente e de um cilindro hidráulico, montados sobre o carro. A carga é sempre deslocada em um único sentido. O retorno se dá com o rodado suspenso, como mostra a Figura 4.3, com o objetivo de reduzir as condições de tráfego reais que ocorrem em uma rodovia. Ao operar sobre as pistas experimentais, o simulador foi programado para ter um tempo de ciclo de 16 a 18 segundos, permitindo a aplicação de 225 ou 220 ciclos de carga, respectivamente, a cada hora de operação. Ainda, com relação ao sistema de aplicação de carga, deve-se observar que:
  - A aplicação de cargas de eixo superiores à carga padrão permite acelerar a degradação de pavimentos experimentais. De acordo com *US Corps of Engineer*, uma passagem de eixos com cargas de 100 kN e 120 kN equivale, do ponto de vista destrutivo a 3,53 e 11,2 passagens do eixo padrão, respectivamente (Núñez, 1997).
  - Apresentado por Núñez (1997), como mostra o Quadro 4.1, existe uma relação do tempo de operação do simulador que leva para reproduzir a degradação que um pavimento com volume médio de tráfego para aplicar  $10^6$  cargas de eixo padrão ao longo da vida projetada.

Quadro 4.1: Tempo de operação do simulador para simular  $10^6$  cargas de eixo padrão

Tempo para aplicação de $10^6$ ciclos	Carga de eixo aplicada pelo simulador (kN)		
	82	100	130
Em horas	4.444	1.259	253
Em dias	400	113	23

(Núñez 1997)



Figura 4.3: Retorno do rodado

- Sistema de amortecimento: é um dispositivo de segurança composto de molas helicoidais colocadas nas extremidades dos trilhos de guiamento e tendo como função a parada com segurança do carro caso ocorra falha do sistema de controle;
- Sistema de acionamento: o equipamento é acionado por um motor de indução trifásico de rotor bobinado, para regime intermitente, com freio eletromagnético, com potência de 15 CV e um redutor. Este conjunto aciona um tambor que está ligado a cabo de aço que movimenta o carro. O cabo de aço possui um mecanismo esticador em uma das extremidades, de forma a mantê-lo sempre tracionado;
- Sistema de rodado: o rodado é ligado ao carro por um garfo articulado, que possui um semi-eixo de caminhão na extremidade, onde o rodado é fixado. Este semi-eixo é regulável, de forma a permitir o alinhamento do rodado. São utilizados rodados comerciais de caminhão;
- Estrutura de suporte geral: é composta por painéis Bailey tipo BB.1 sobrepostos, que o DAER-RS estava desativando, e que anteriormente eram utilizados para a construção

de pontes provisórias de emergência. Esta estrutura serve de reação às cargas, e é apoiada sobre duas vigas caixão localizadas nas extremidades;

- Sistema de controle: o equipamento é acionado através de um quadro de comando elétrico com grau e proteção IP54, desenvolvido especialmente para esta função, e que através de um microprocessador acoplado, aciona todos os sistemas do simulador de tráfego. Também faz parte do sistema de controle um quadro de resistor, que tem como função o controle da velocidade de acionamento;
- Sistema de aceleração e desaceleração: a aceleração e desaceleração do carro são comandadas pelo sistema de controle, através da variação da tensão de alimentação, e segundo um sinal elétrico originário de sensores óticos, dispostos ao longo dos trilhos de guiamento do carro;
- Sistema de deslocamento transversal: o equipamento em operação tem um deslocamento transversal coordenado com o longitudinal, de forma a impedir a formação de trilhas por passagem das rodas em um único local. Frações deste deslocamento ocorrem toda vez que o rodado retorna suspenso para o início de cada ciclo. Este movimento é realizado pelo deslocamento de toda a estrutura sobre um elemento guia existente em cada uma das vigas-caixão de apoio, externas ao equipamento. O deslocamento ocorre sobre roletes fixos à viga de apoio da estrutura e é acionado por motores elétricos de 3 CV com redutor, instalados nestas vigas, em cada extremidade do equipamento. O movimento é obtido através de correias ligadas às vigas externas de apoio. O movimento transversal pode ser programado com diferentes larguras, o que permite evitar a canalização do tráfego.

## 5 METODOLOGIA DA PESQUISA

Durante a solicitação do pavimento experimental pelo simulador de tráfego através da técnica de ensaios acelerados foram estudados vários parâmetros com o objetivo de avaliar o comportamento funcional e estrutural do recapeamento asfáltico com adição de borracha.

Os parâmetros analisados para a obtenção dos resultados foram:

- Parâmetros de resposta estrutural (tensões, deformações, deflexões e bacias deflectométricas);
- Parâmetros de comportamento (reflexão de trincas e deformações permanentes);
- Parâmetros de textura superficial (macrotextura e microtextura);
- Parâmetros ambientais (precipitações e temperaturas do ar e pavimento).

### 5.1 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL

O acompanhamento da resposta estrutural do pavimento foi realizado semanalmente através das medições de deflexão em seções transversais ao pavimento e também pelas leituras de células de tensão e dos extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*).

#### 5.1.1 Medidas Deflectométricas

A resposta estrutural do pavimento foi acompanhada através de medidas deflectométricas realizadas com a viga Benkelman e com a viga eletrônica. As medições deflectométricas foram efetuadas com o rodado do simulador de tráfego empregando diferentes níveis de carga e suas respectivas pressões de inflação dos pneus, conforme mostra o Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Carga e inflação dos pneus

Carga de eixo aplicado (kN)	Carga por pneu (kN)	Inflação dos pneus (MPa)
82	20,5	0,55 (80 psi)
100	25,0	0,62 (90 psi)
120	30,0	0,69 (100 psi)

#### 5.1.1.1 Viga Benkelman

Empregou-se a viga Benkelman que é um dispositivo simples e difundido para o levantamento de deflexões do pavimento com a evolução do número de passadas do trem de cargas do simulador, como mostra a Figura 5.1.

A viga Benkelman é constituída por uma viga horizontal apoiada sobre três pés, sendo um traseiro e dois dianteiros. Um braço de prova é rotulado na parte frontal da viga de referência, tendo sua porção maior posicionada adiante da viga, e a menor sob ela. A ponta do braço de prova deve tocar o pavimento no ponto a ser ensaiado, enquanto na outra extremidade aciona um extensômetro, solidário à viga, sensível a 0,001 mm.

Este ensaio foi realizado em cinco seções transversais ao pavimento (S2, S3, S4, S5 e S6) e em cada seção foram obtidas três leituras, para os três níveis de carregamento aplicados com suas respectivas pressões de inflação conforme o Quadro 5.1. Juntamente com o monitoramento de todas as medições foram registradas as temperaturas do ar e temperatura do pavimento.



Figura 5.1: Viga Benkelman

#### 5.1.1.2 Viga eletrônica

Foram levantadas bacias defletoométricas com o emprego de um defletoógrafo digital (vida eletrônica), que tem o princípio de medida semelhante com viga Benkelman, porém não idênticos.

O defletoógrafo digital, como mostra a Figura 5.2, é montado sob o veículo de teste e, uma vez posicionado, as deflexões são medidas e gravadas em cada ponto de teste, enquanto o rodado do simulador de tráfego está em movimento.

Os levantamentos de bacias defletoométricas foram realizados em 4 seções transversais do pavimento (S2, S3, S4 e S5) e em cada seção foram obtidas 3 leituras, para 2 níveis de carregamento aplicados (82 kN e 100 kN). Durante as medições foram registradas as temperaturas do ar e as temperaturas do pavimento.



Figura 5.2: Vista lateral do deflectógrafo digital e da rodinha com odômetro ao rodado do simulador

Também se utilizou as deflexões medidas pelo deflectógrafo digital para calcular o raio de curvatura.

#### 5.1.1.3 Correções das deflexões

Utilizou-se a correção das medidas de deflexão através de um gráfico apresentado no Guia da AASHTO de 1993, o qual fornece coeficientes que transformam a deflexão medida em deflexões a temperatura de 20 °C.

A equação que foi utilizada para o cálculo da deflexão corrigida foi obtida através de regressão linear dos pontos do gráfico da ASSHTO (1993), para a espessura de camada asfáltica estudada, conforme mostrado na Figura 5.3.

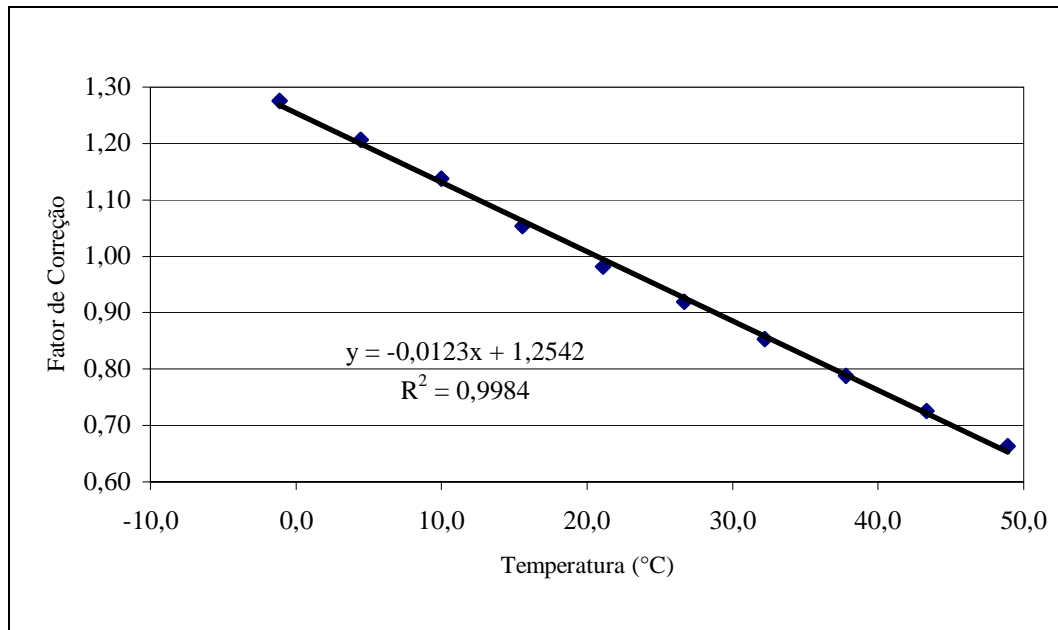


Figura 5.3: Fatores de correção para o recapeamento em asfalto-borracha pelo AASHTO

Realizou-se um levantamento deflectométrico como objetivo de estabelecer uma relação específica entre a temperatura e deflexão para o recapeamento estudado. O levantamento foi realizado numa faixa de 20 ° a 33 °C em 4 seções ( S2, S3, S4 e S5) do pavimento recapeado, mas não deu resultado devido à dispersão dos dados, logo foram corrigidas as deflexões pelo gráfico da AASHTO (1993).

A Figura 5.4 apresenta os fatores de correção das deflexões em função da temperatura obtidas em ensaios.

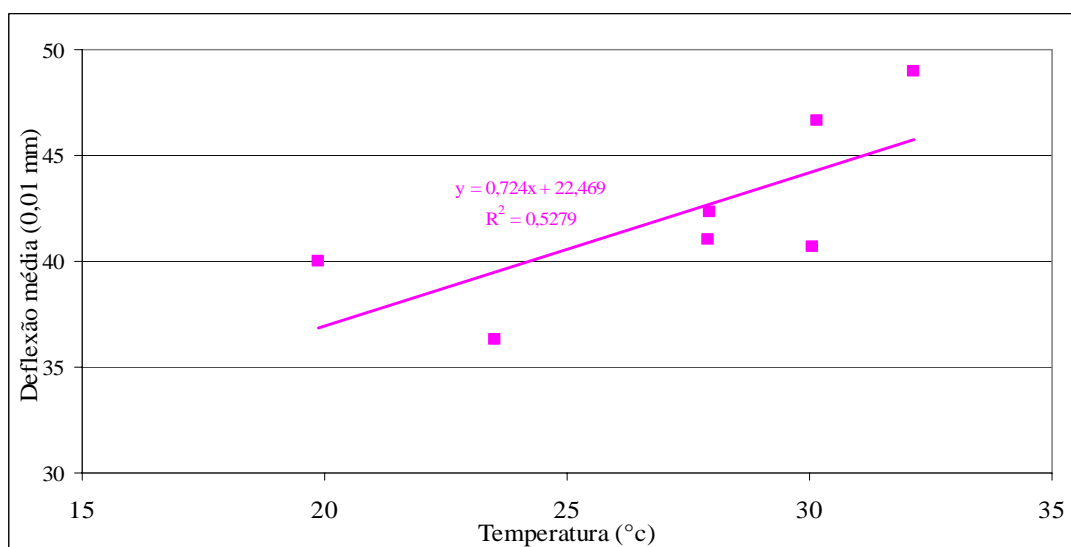


Figura 5.4: Fatores de correção das deflexões em função das temperaturas obtidas em ensaios



### 5.1.2 Tensões e Deformações

Fez-se o acompanhamento das tensões e deformações através do registro de sinais emitidos pelos instrumentos instalados no interior da estrutura, por um sistema de aquisição de dados de maneira operacional. Estes sinais foram lidos por um microcomputador e processados pelo programa SAD32. Os dados recolhidos por este programa são gráficos que relacionam o tempo em segundos com a leitura realizada pelo sensor, em milivolt. Esta leitura é mostrada em forma de pulsos de tensão e deformação divididos em canais. Nos canais 0, 1 e 2 foram registrados pulsos de deformação: deformação longitudinal, deformação 45° e deformação transversal, respectivamente, e nos canais 3 e 4 os pulsos de tensão vertical e horizontal, respectivamente.

A Figura 5.5 mostra um exemplo da leitura de sensores processado pelo programa SAD32 mostrando os pulsos de tensão e deformação separados em canais.

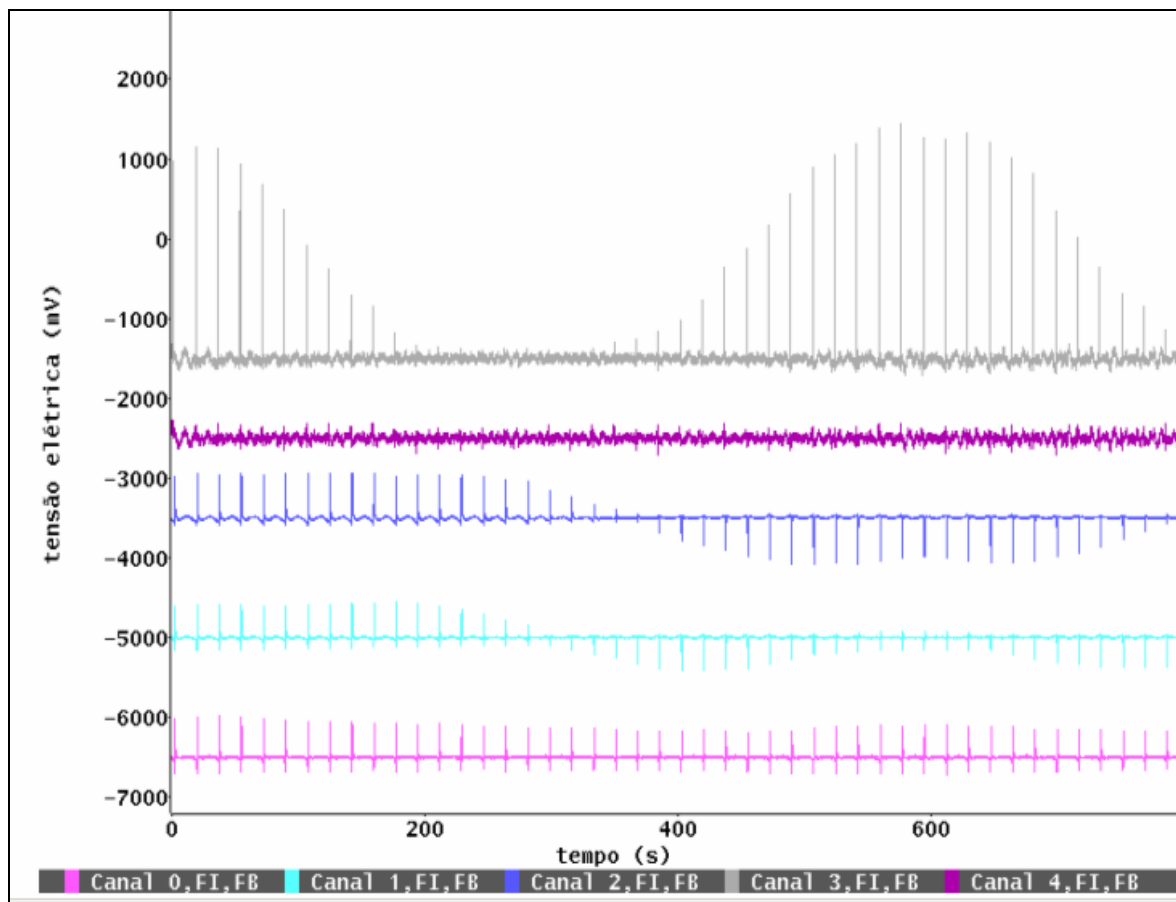


Figura 5.5: Exemplo de leitura dos sensores

Para cada leitura dos instrumentos foi determinado um tempo de 2.000 segundos, para que o rodado do simulador varresse toda a largura da pista e para verificar a repetição dos pulsos durante a leitura.

Os dados depois de lidos foram tratados com o filtro digital chamado *Butterworth* com o objetivo de filtrar interferência de sinais de alta frequência. Um outro filtro denominado Ideal foi utilizado para obter os sinais em um sistema de referência. A leitura dos pulsos é em função da diferença de tensão elétrica que o carregamento estabelece ao sensor.

Foram instaladas duas células de pressão (uma horizontal e outra vertical) na interface entre o pavimento trincado e o recapeado com a finalidade de determinar as tensões atuantes no pavimento durante a passagem dos ciclos de carga.

As Figuras 5.6 e 5.7 representam formas típicas de pulsos de tensão registradas com passadas da carga de roda, com carga de eixo aplicado (100 kN).

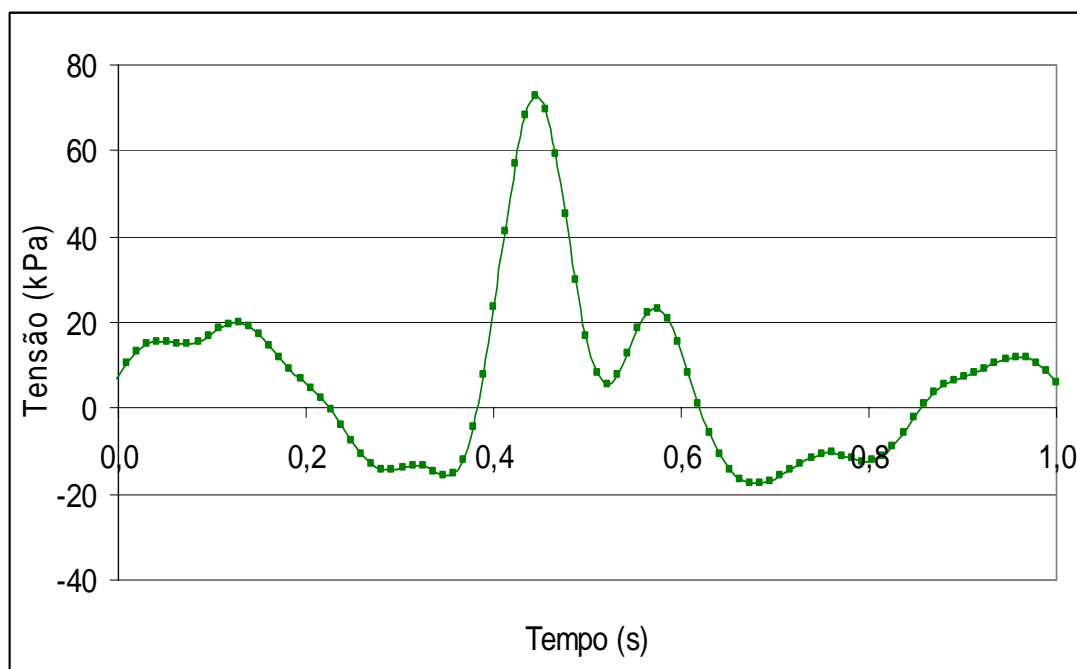


Figura 5.6: Forma típica dos pulsos de tensão vertical

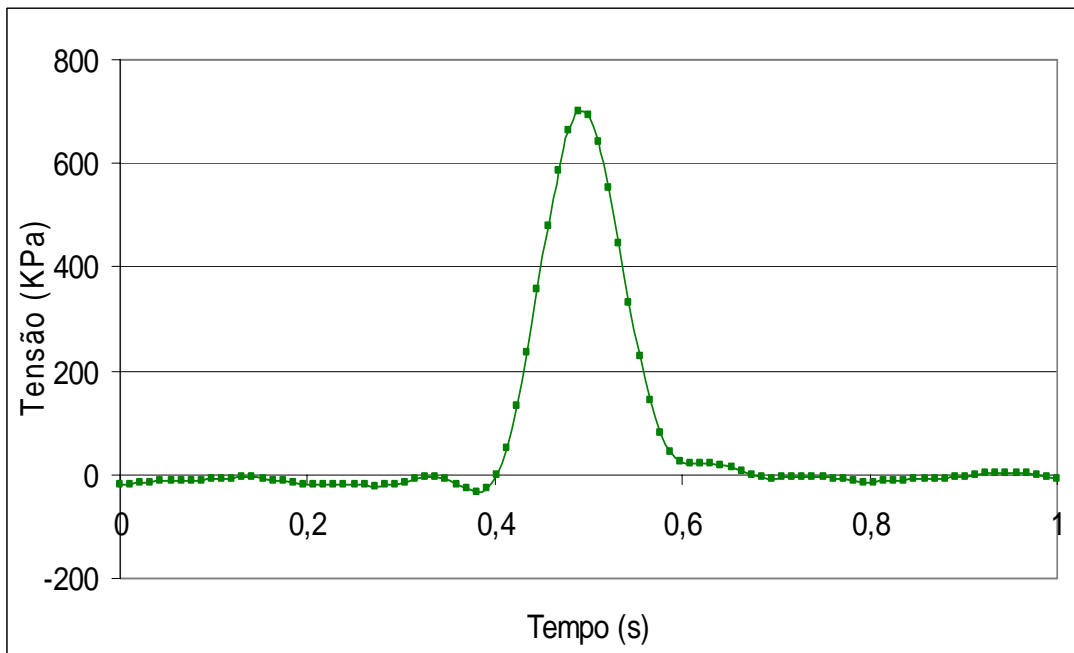


Figura 5.7: Forma típica dos pulsos de tensão horizontal

As Figuras 5.8 a 5.10 representam formas típicas de pulsos de deformações registradas na passadas da carga de roda com carga de eixo aplicado (100 kN).

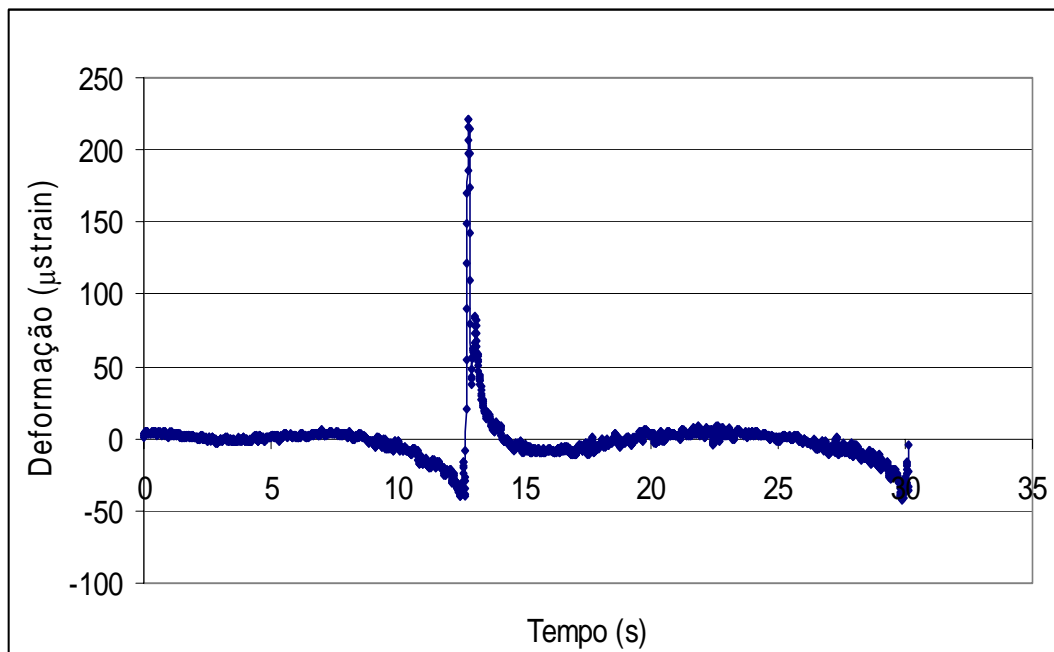


Figura 5.8: Forma típica dos pulsos de deformação longitudinal

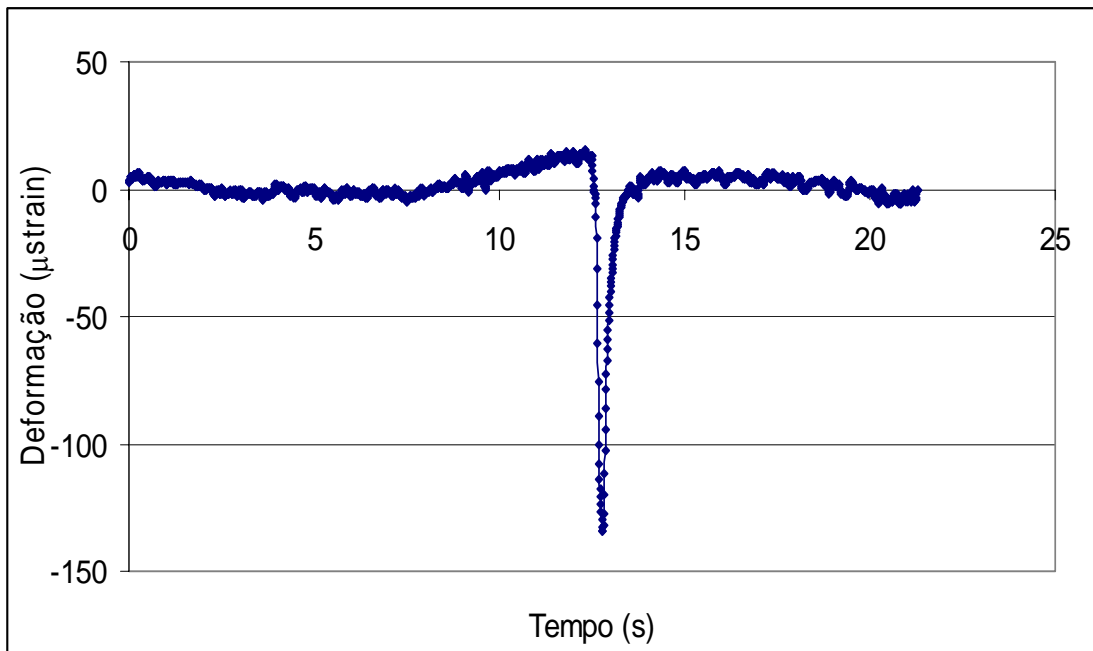


Figura 5.9: Forma típica dos pulsos de deformação transversal

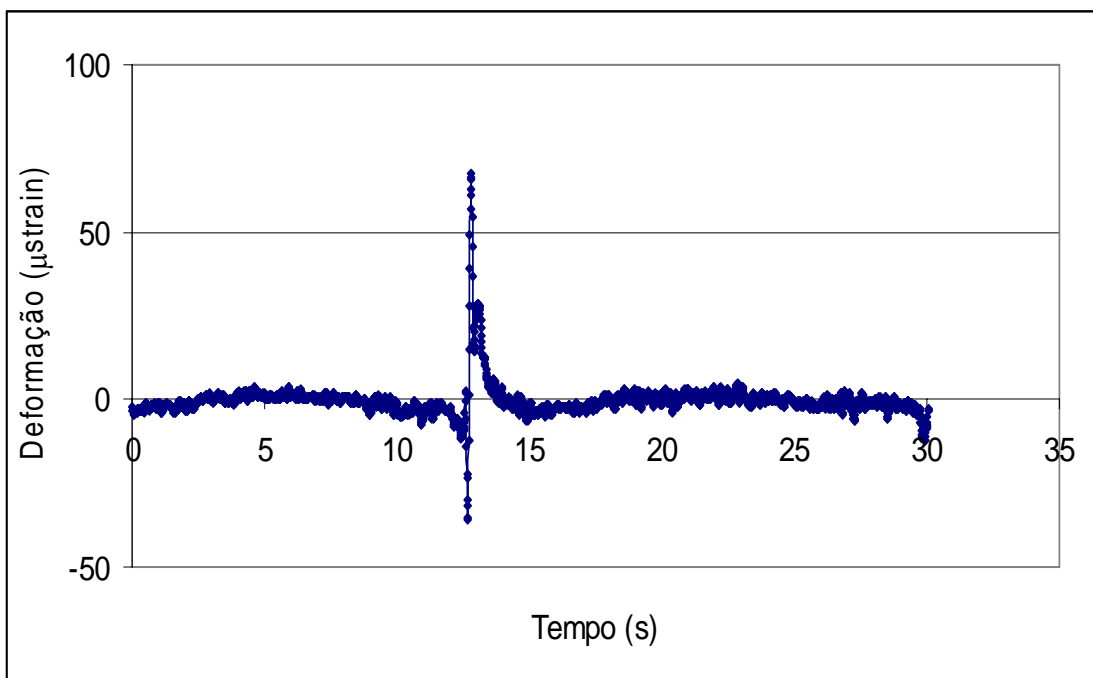


Figura 5.10: Forma típica dos pulsos de deformação 45°

## 5.2 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO

Os parâmetros de comportamento avaliados foram o trincamento por reflexão e as deformações permanentes.

### 5.2.1 Reflexão de Trincas

O levantamento das trincas que surgiram no recapeamento foram realizadas pela inspeção visual semanalmente ao longo do período de solicitação com o simulador de tráfego.

Para facilitar o mapeamento, as trincas foram pintadas com tinta de cores diferentes conforme seus surgimentos, como mostra a Figura 5.11.



Figura 5.11: Trincas pintadas em cores diferentes indicando a ordem do surgimento

Após a identificação com pintura, as trincas foram desenhadas num papel milimetrado com auxílio de uma grade metálica de 1,0 x 1,0 m. Esta grade metálica, subdividida em quadrados de 10 cm, foi colocada sobre o revestimento trincado, com o objetivo de facilitar o mapeamento das trincas, como mostra a Figura 5.12.



Figura 5.12: Grade metálica usada no mapeamento de trincas

Posteriormente mediu-se o comprimento de cada trinca, de forma a calcular-se um fator de severidade dado pelo quociente entre a soma dos comprimentos das trincas e a superfície solicitada pelo rodado.

### 5.2.2 Deformações Permanentes

Os levantamentos para a avaliação de evolução das deformações permanentes foram realizados com um equipamento denominado transverso-perfilógrafo, mostrado na Figura 5.13.

Este equipamento tem como objetivo obter o afundamento de trilha de roda (ATR) pela comparação entre os perfis transversais levantados após determinado número de ciclos e os perfis levantados antes do início do tráfego da pista. A reprodução do perfil é feita em papel milimetrado e é representada na direção vertical em verdadeira grandeza e na direção horizontal na escala 1:20 ou 1:10.

Os levantamentos dos afundamentos de trilha de roda foram realizados semanalmente em 7 seções (S1 a S7) na pista experimental, correspondente aos eixos das áreas trincadas e das áreas não trincadas submetidas ao carregamento.



Figura 5.13: Transverso-perfilógrafo

### 5.3 PARÂMETROS DE TEXTURA SUPERFICIAL

Foram acompanhados a evolução de parâmetros de textura superficial do pavimento com o tráfego.

As medições de macrotextura e microtextura foram avaliados em dois ensaios:

- Pêndulo Britânico;
- Mancha de Areia.

### 5.3.1 Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico, mostrado na Figura 5.14, é um equipamento portátil e sua utilização é especificada pelo método da ASTM E-303-93.

Um pêndulo com uma sapata de borracha é lançado em direção ao pavimento molhado, com o objetivo de medir-se a perda de energia, quando a sapata desliza sobre a superfície do pavimento (ASTM, 1998). Através da diferença de altura do movimento do pêndulo obtém-se uma medida indireta da microtextura superficial, podendo-se avaliar a perda de resistência à derrapagem em função do tráfego. Os resultados são dados em BPN (British Pendulum Number).

Esse ensaio foi realizado semanalmente em 7 seções (S1 a S7) e em cada seção foram registrados 3 medidas.



Figura 5.14: Pêndulo Britânico



### 5.3.2 Mancha de Areia

O ensaio mancha de areia, mostrado na Figura 5.15, consiste na determinação da profundidade média da mancha de areia em superfícies de pavimento com o objetivo de obter características de macrotextura, conforme preconizado pela ASTM E 965-96.

O ensaio consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com micro esferas de vidro semelhantes à areia fina, de volume, peso e densidade conhecidos. Espalharam-se as micro esferas sobre a superfície com um bastão padronizado, até o preenchimento total da rugosidade do revestimento, obtendo-se uma mancha. Mede-se o diâmetro do círculo e, com essa medida, obtém-se a altura da mancha resultando na medida da macrotextura da superfície.

Este ensaio foi realizado semanalmente em 3 seções (S2, S4 e S6) e em cada seção foram feitas 3 medidas.

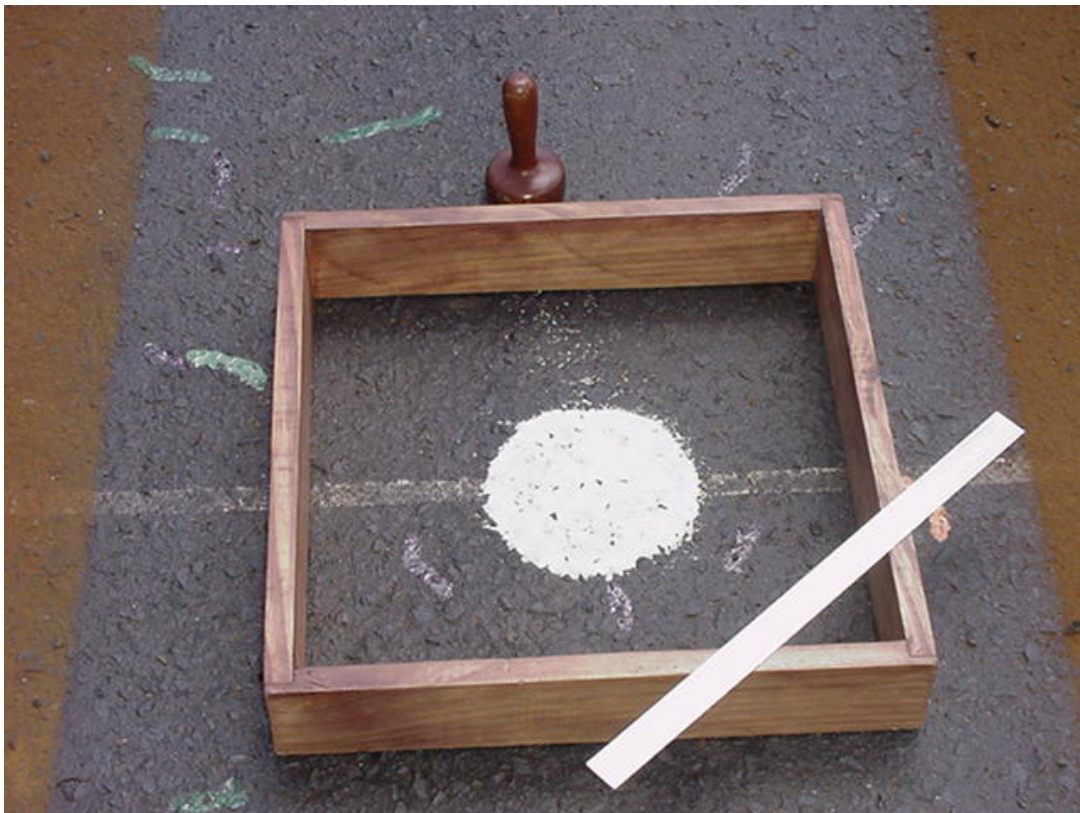


Figura 5.15: Mancha de Areia

## 5.4 PARÂMETROS AMBIENTAIS

Como os pavimentos são diretamente influenciados pelas condições ambientais foram registradas temperaturas máximas, médias e mínimas do ar, precipitações pluviométricas e temperaturas do pavimento, no decorrer da solicitação da pista experimental.

As temperaturas do ar e as precipitações pluviométricas foram registradas diariamente através de uma estação metereológica que se localizava na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS.

A temperatura no interior do pavimento foi registrada através de um termômetro digital de precisão, mostrado na Figura 5.16, do tipo Gulterm 180, com resolução de 0,1 °C. Estas temperaturas foram medidas a uma profundidade de 5 cm, que corresponde à interface entre o recapeamento de concreto asfalto-borracha e o pavimento antigo.



Figura 5.16: Termômetro digital

O sensor de temperatura usado para medir a temperatura do pavimento é um sensor de precisão, do tipo LM35, fabricado pela *National Semiconductors*. A sua saída é proporcional à temperatura, em graus Celsius. A faixa de temperatura que esse termômetro mede é - 50°C a + 150°C.

## 5.5 ANÁLISE MECANÍSTICA

A análise mecânica foi feita através do programa Elsym5, tendo os seguintes resultados:

- Posição da linha neutra;
- Corrigir o efeito de temperatura na reflexão de trincas;
- Contribuições das camadas nas deflexões e efeitos da temperatura nas deflexões;
- Comparar tensões e deformações medidas na instrumentação e estudadas analiticamente.

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 CONDIÇÕES DO PAVIMENTO EXPERIMENTAL NO INÍCIO DO ESTUDO ANALISADO NESTA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados das medições dos parâmetros de resposta estrutural, de comportamento, de textura superficial e ambiental realizadas durante a solicitação do pavimento experimental pelo Simulador de Tráfego DAER/UFRGS.

De julho de 2003 a janeiro de 2004 a mesma pista experimental foi estudada por Cruz (2005), analisando a reflexão de trincas decorrente da aplicação de cargas pelo Simulador de Tráfego.

A seguir estão relacionados às condições finais da pista trafegada estudada por Cruz (2005):

- Número de ciclos (N) de carga de eixo de 100 kN aplicados pelo Simulador de tráfego: 123.356;
- Nível final de deflexão característica com carga de eixo de 100 kN para áreas trincadas (AT):  $53 \times 10^{-2}$  mm;
- Nível final de deflexão característica com carga de eixo de 100 kN para áreas não trincadas (ANT):  $49,7 \times 10^{-2}$  mm;
- Deformação permanente média final (ATR): 5,6 mm;
- Densidade final do trincamento:  $8,6 \text{ cm/m}^2$ ;
- Deformação longitudinal ( $\epsilon_x$ ) com 75.700 número de ciclos aplicados: 113  $\mu\text{strain}$ ;
- Deformação transversal ( $\epsilon_y$ ) com 75.700 número de ciclos aplicados: 139  $\mu\text{strain}$ ;
- Deformação a  $45^\circ$  ( $\epsilon_{x,y}$ ) com 75.700 número de ciclos aplicados: 30  $\mu\text{strain}$ ;
- Deformações nas direções principais ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) com 75.7000 número de ciclos aplicados: 159  $\mu\text{strain}$  e 93  $\mu\text{strain}$ .

## 6.2 HISTÓRICO DE CARREGAMENTO

Nesta dissertação analisa-se a evolução do trincamento na pista em recapeamento em asfalto-borracha, focalizando-se as degradações decorrentes da solicitação no período de junho de 2004 a fevereiro de 2005, totalizando aproximadamente 390.000 ciclos de carga, com carga de eixo de 100 kN. Considerando, ainda o número de ciclos de carga aplicadas durante o estudo de Cruz (2005) ( $N = 123.356$  ciclos de carga), verifica-se que no pavimento experimental foram aplicadas aproximadamente 513.000 ciclos de carga.

A atuação do Simulador de Tráfego durante o período de solicitação da pista experimental nesta pesquisa está representado na Figura 6.1, onde se relaciona o número de semanas com o número de ciclos aplicados acumulados (N), com carga de eixo de 100 kN.

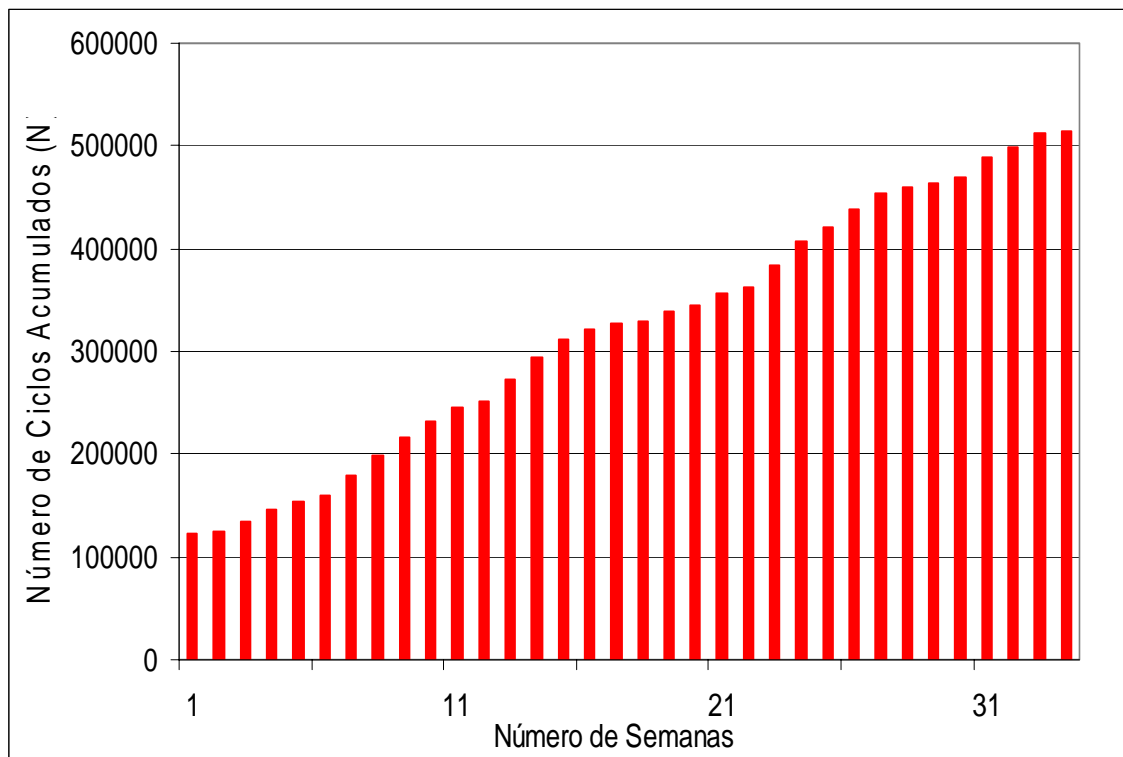


Figura 6.1: Histórico do carregamento da pesquisa com carga de eixo de 100 kN

O Quadro 6.1 apresenta o número de cargas de eixo de 100 kN aplicado em cada mês durante a solicitação desta pista.

Quadro 6.1: Aplicação de carga de eixo de 100 kN por mês

Mês de aplicação	Número de ciclos de carga aplicados (N)
Julho a Janeiro 2004 (Cruz, 2005)	123.356
Junho 2004	29.906
Julho 2004	77.733
Agosto 2004	69.771
Setembro 2004	26.576
Outubro 2004	16.567
Novembro 2004	26.095
Dezembro 2004	83.418
Janeiro 2005	36.950
Fevereiro 2005	23.076
Total	513.448

O Simulador de Tráfego teve maior produtividade nos meses de julho, agosto e dezembro de 2004 (semanas 6 a 15 e 23 a 27). O mais baixo rendimento ocorreu nos meses de setembro e outubro de 2004 (semanas 16 a 20), devido o equipamento apresentar problemas mecânicos, e nos meses de janeiro e fevereiro de 2005 por causa das elevadas temperaturas (semanas 28 a 34). Neste particularmente observa-se que para evitar o acúmulo acentuado de deformações permanentes nas camadas asfálticas, foi definido que quando a temperatura do pavimento superasse 38 °C o tráfego seria interrompido.

### 6.3 PARÂMETROS AMBIENTAIS

A Figura 6.2 apresenta os registros de precipitações pluviométricas que ocorreram durante os períodos desta pesquisa AB (recapeamento em asfalto-borracha) e a de Cruz (2005) (AB Cruz- recapeamento em asfalto-borracha).

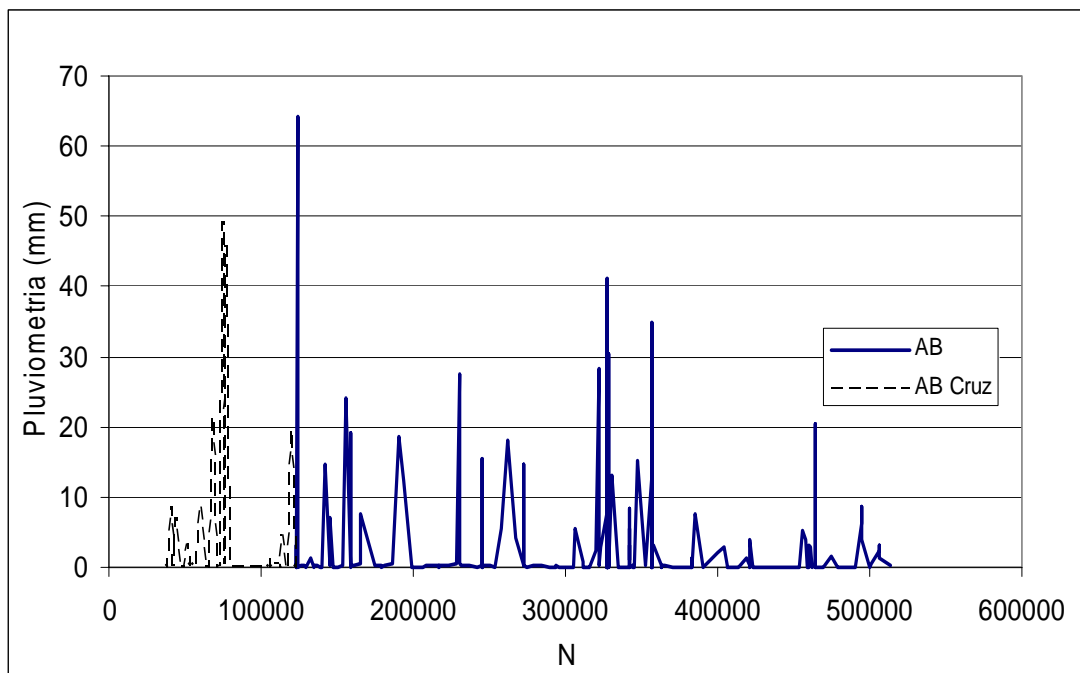


Figura 6.2: Precipitações pluviométricas durante a solicitação do pavimento

No período de ensaio AB a precipitação total registrada foi de 732 mm em 9 meses. No início do ensaio AB entre  $N=123.356$  e  $N=370.000$  ciclos foram registradas as maiores frequências de chuva, totalizando 88,6 % das precipitações.

A partir de  $N=370.000$  ciclos de carga até o final do ensaio (aproximadamente  $N=513.000$ ) registraram-se 11,4 % das precipitações. A chuva mais intensa teve no decorrer do ensaio ( $N=124.560$  ciclos) foi de 64,20 mm. Esse registro representou 8,8 % do total de todas as precipitações ocorridas durante a pesquisa.

A Figura 6.3 apresenta as temperaturas máximas, médias e mínimas diárias registradas no decorrer desta pesquisa e de Cruz (2005).

Um dos fatores que contribuem para o crescimento das degradações, principalmente para a reflexão de trinca são as baixas temperaturas.

Verifica-se na Figura 6.3 que:

- A menor temperatura mínima foi 1,6 °C, e a maior temperatura mínima foi 23 °C;
- A menor temperatura média diária foi 7,8 °C, e a maior temperatura média diária foi 28,5 °C;

- A menor temperatura máxima foi 10,9 °C, e a maior temperatura máxima 39,2 °C.

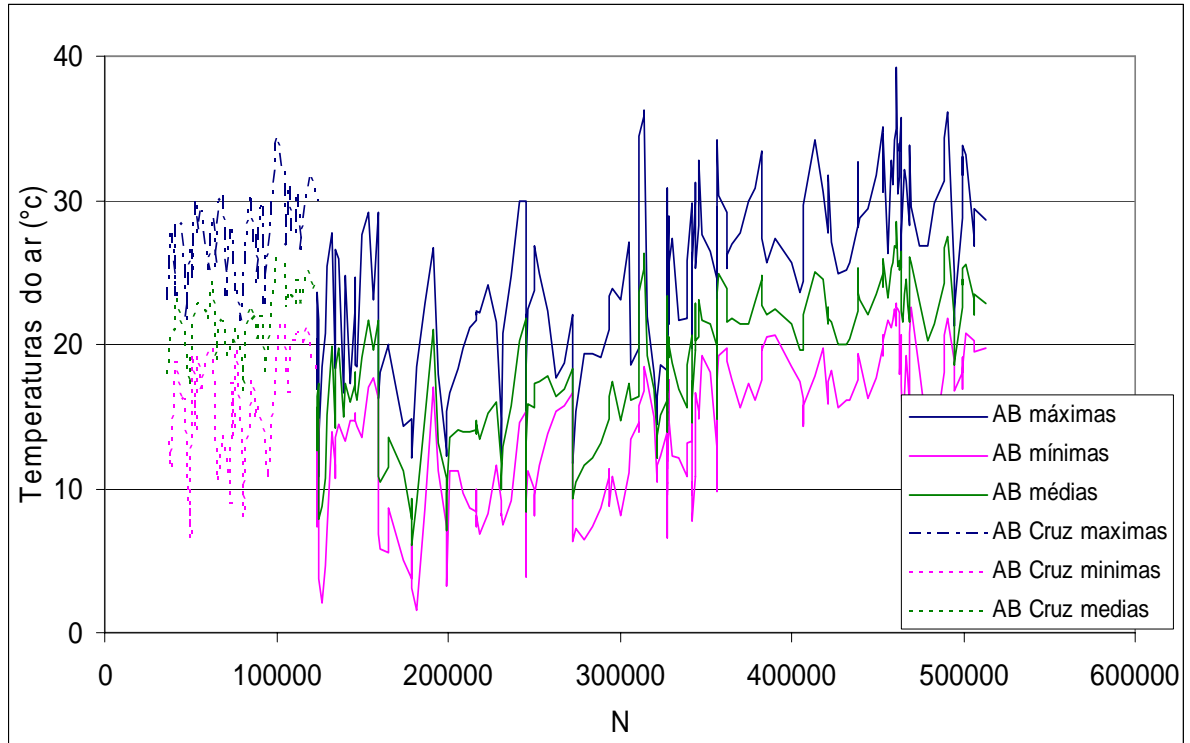


Figura 6.3: Temperaturas diárias

A Figura 6.4 apresenta a distribuição da frequência das temperaturas máximas no decorrer deste experimento.

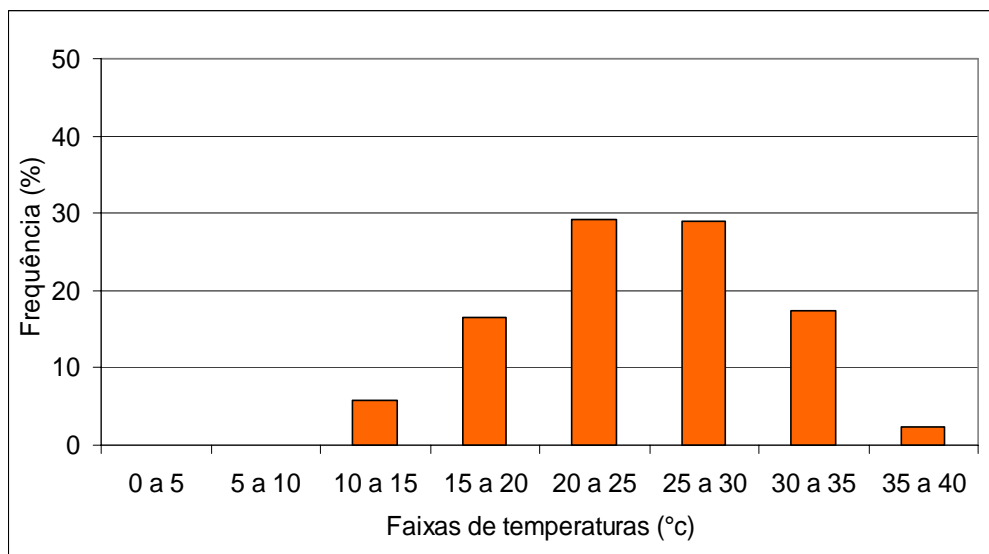


Figura 6.4: Distribuição de frequência das temperaturas máximas do ar



A Figura 6.4 mostra que os ensaios realizaram-se nas faixas entre 5 e 40° C, sendo que a maior frequência se deu na faixa de temperatura entre 20 a 30 °C, com 58% da frequência total. Apenas 5,8 % da frequência de temperaturas ficaram abaixo de 15 °C.

A Figura 6.5 mostra um comparativo entre as distribuições de frequência de temperaturas máximas durante os ensaios realizados por Cruz (2005) (recapeamento em asfalto-convencional), Azambuja (2004) (recapeamento em asfalto-convencional) e desta pesquisa (recapeamento em asfalto-borracha).

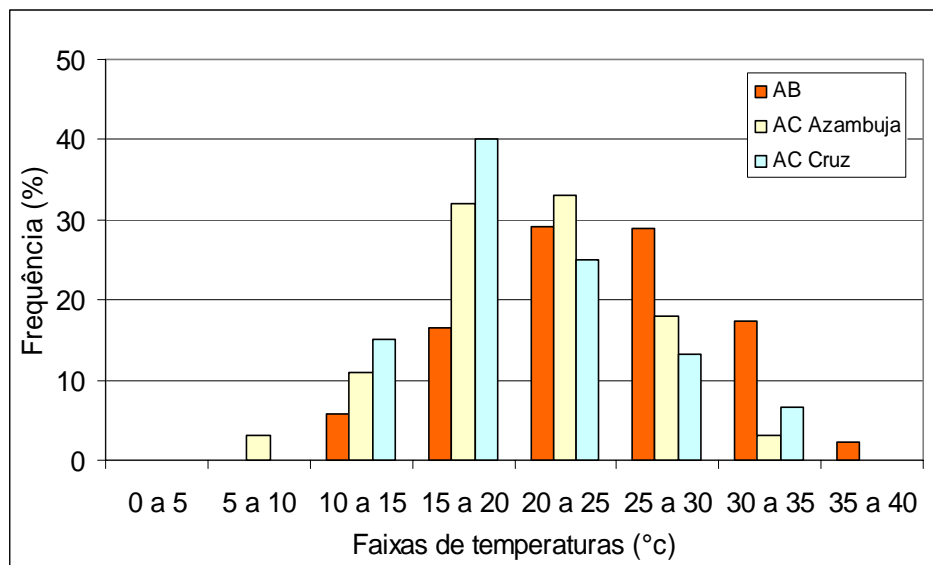


Figura 6.5: Distribuição de frequência de temperaturas máximas durante vários estudos de reflexão de trincas

Observa-se que:

- Nos estudos de Azambuja (2004) e Cruz (2005) em recapeamentos em concreto asfáltico 2/3 das solicitações correspondem a temperaturas máximas entre 15 °C e 25 °C;
- O estudo de Azambuja (2004) foi realizado em período com temperaturas do ar mais baixas;
- No estudo relatado nesta dissertação foram registradas as maiores temperaturas máximas.

## 6.4 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL

### 6.4.1 Deflexões

A medida de deflexão caracteriza o comportamento estrutural do pavimento à aplicação do carregamento, proporcionando um indicativo de elasticidade da estrutura. Quando a carga dinâmica atua na superfície do pavimento, todas as camadas fletam devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento.

Utilizou-se a viga Benkelman em levantamentos realizados semanalmente, e correlacionados com o número de solicitações (N), para 3 níveis de carga de eixo (80 kN, 100 kN e 120 kN).

As Figuras 6.6 a 6.8 apresentam as deflexões médias para os 3 níveis de carga de eixo nas áreas não trincadas (ANT) e nas áreas trincadas (AT) do pavimento. Observa-se que os termos trincados e não trincados referem-se a áreas nas quais, a camada subjacente ao recapeamento foi ou não trincado (serrado), como detalhado no capítulo de construção do pavimento experimental.

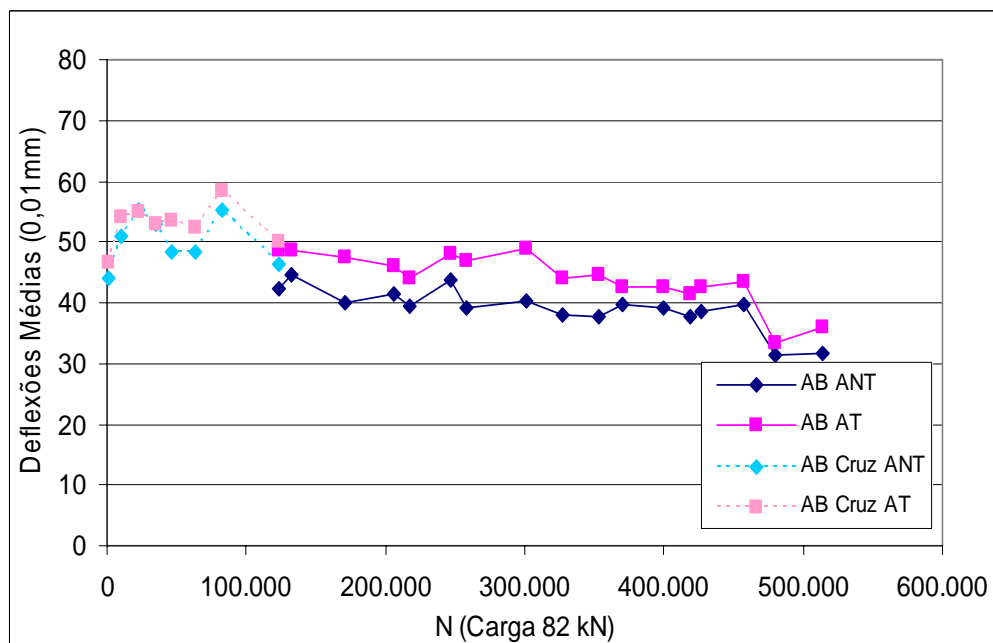


Figura 6.6: Deflexões médias sob carga de eixo de 82 kN

Na Figura 6.6 incluem-se dados de Cruz (2005), correspondentes a primeira fase de solicitação do pavimento.

As deflexões médias nas áreas trincadas (AB AT) desde do início do ensaio (AB) foram maiores que as correspondentes às áreas não trincadas (AB ANT). A deflexão média inicial nas áreas trincadas foi de  $48,5 \times 10^{-2}$  mm e nas áreas não trincadas foi de  $42,3 \times 10^{-2}$  mm; uma diferença de 12,8%.

A partir dos 450.000 ciclos de carga a deflexão média nas áreas trincadas (AB ANT), bem como nas áreas não trincadas (AB AT) decresceu. Esse efeito pode ser atribuído a um aumento dos módulos de resiliência do subleito e das camadas granulares, em função das temperaturas mais elevadas (Figura 6.3) e das reduzidas precipitações (Figura 6.2).

Estudos previamente realizadas na Área de Pesquisas de Testes de Pavimentos evidenciaram que o módulo de resiliência do subleito é fortemente influenciado pela sucção. Núñez (1997) relatou que a redução do teor de umidade do solo e o decorrente aumento da sucção causava variações significativas no módulo de resiliência (com sucção nula tinha-se  $MR = 126$  MPa, e com sucção igual a 10 kPa, o módulo alcançava os 300 MPa).

Também não deve descartar-se a possibilidade de enrijecimento (aumento do módulo) do revestimento asfáltico, decorrente de envelhecimento um tanto precoce do ligante asfáltico modificado por borracha.

A deflexão média final decresceu bastante em relação ao início do ensaio. Nas áreas trincadas (AB AT) foi de  $36 \times 10^{-2}$  mm e nas não trincadas (AB ANT)  $31,7 \times 10^{-2}$  mm. Esta diferença praticamente manteve-se a mesma do início ao término do ensaio desta pesquisa (AB).

As deflexões médias sob carga de eixo de 100 kN mostradas na Figura 6.7 foram maiores do que correspondentes às cargas de eixo de 82 kN (Figura 6.6), como era de esperar-se.

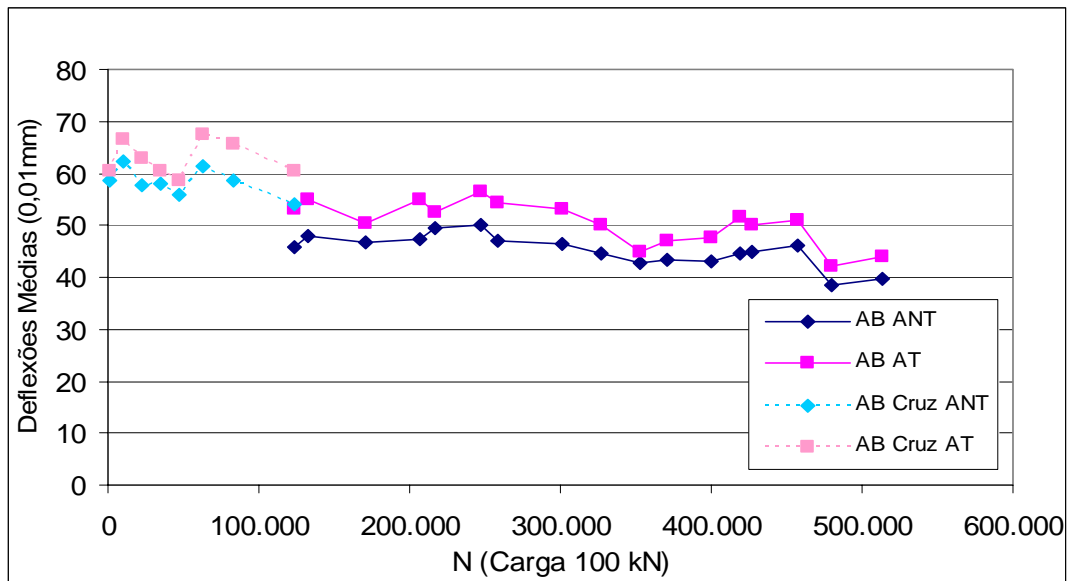


Figura 6.7: Deflexões médias sob carga de eixo de 100 kN

A deflexão média inicial nas áreas trincadas (AB AT) foi maior do que nas áreas não trincadas (AB ANT), o que também era o esperado. Aos 350.000 ciclos de carga houve um decréscimo de deflexão tanto nas áreas trincadas (AB AT) quanto nas não trincadas (AB ANT). Aos 470.000 ciclos registrou-se um decréscimo maior de deflexão em ambas as áreas.

A deflexão média final continuou apresentando maior valor nas áreas trincadas (AB AT) do que nas áreas não trincadas (AB ANT). A deflexão média final nas áreas trincadas foi de  $44 \times 10^{-2}$  mm e nas áreas não trincadas foi de  $39,7 \times 10^{-2}$  mm, esta diferença foi de 9,8 %.

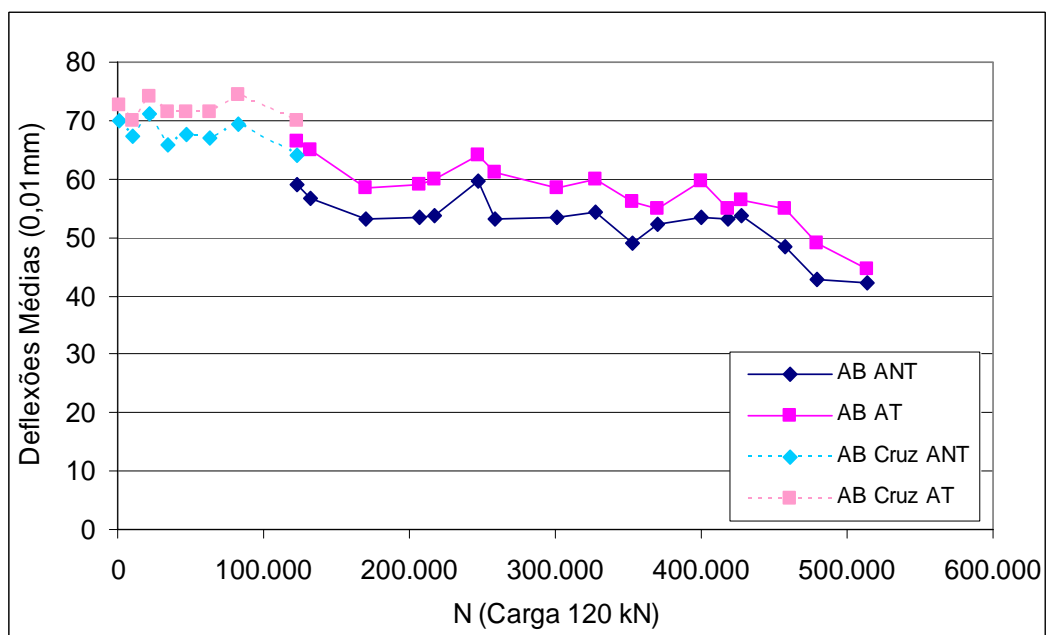


Figura 6.8: Deflexões médias sob carga de eixo de 120 kN

Repetindo o padrão anterior, a Figura 6.8 mostra que a deflexão média inicial nas áreas trincadas, sob carga de eixo de 120 kN foi superior que nas não trincadas. A deflexão média inicial nas áreas trincadas foi de  $66,5 \times 10^{-2}$  mm e nas áreas não trincadas (AB ANT) foi de  $59 \times 10^{-2}$  mm; uma diferença de 11,3 %. Registrou-se um decréscimo nas deflexões nas áreas trincadas e nas áreas não trincadas. A deflexão media final nas áreas trincadas foi de  $44,5 \times 10^{-2}$  mm e nas áreas não trincadas foi de  $42,3 \times 10^{-2}$  mm; uma diferença de 4,9 %.

Notou-se que após 450.000 ciclos de carga houve um decréscimo significativo nas deflexões médias em todos os níveis de carga já atribuídos às condições climáticas que devem ter propiciado um aumento no módulo do subleito e talvez da base.

As deflexões médias nas áreas trincadas para os 3 níveis de carga foram superiores do o que era o esperado, já que o trincamento imposto nestas áreas reduziu o módulo de resiliência da camada asfáltica.

Com os valores das deflexões calcularam-se as deflexões características do pavimento pelo método da AASTHO (1993), que consiste em somar a média das leituras realizadas com desvio padrão.

As Figuras 6.9 a 6.11 mostram as deflexões características, corrigidas pela temperatura na profundidade de 5 cm, correlacionadas com o número de solicitações nas áreas trincadas (AT) e nas áreas não trincadas (ANT), sob cargas de eixo de 82, 100 e 120 kN.

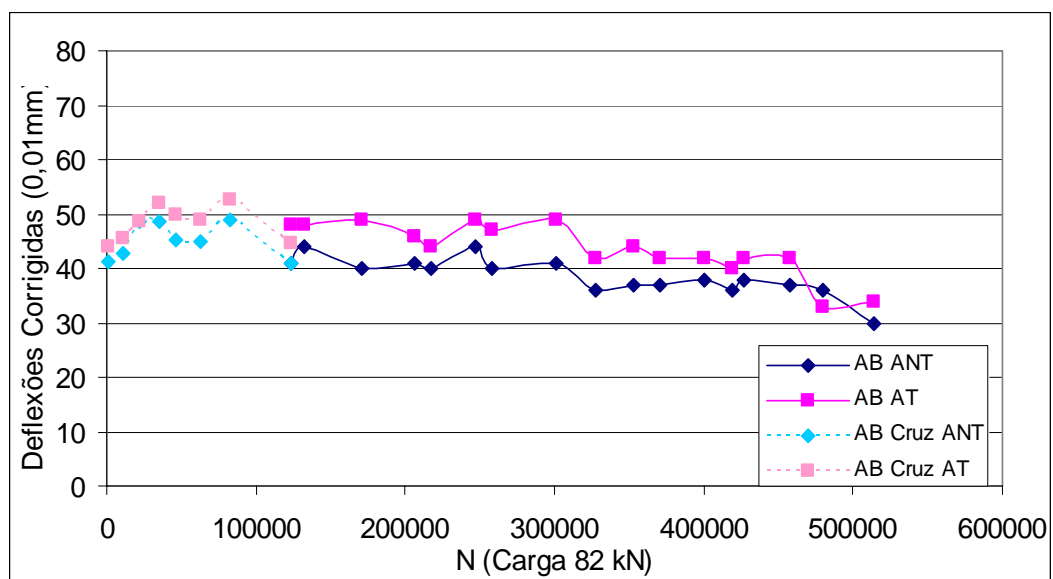


Figura 6.9: Deflexões características corrigidas sob carga de eixo de 82 kN

As deflexões características corrigidas com carga de eixo de 82 kN mantiveram-se praticamente estável até 327.000 ciclos de carga tanto nas áreas trincadas como nas áreas não trincadas. Após experimentaram um leve decréscimo, mantendo-se constante até 450.000 ciclos de carga. Após os 450.00 ciclos as deflexões características tiveram um decréscimo bem significativo em relação ao início do ensaio, possivelmente devido ao aumento do módulo de resiliência do subleito em função do aumento da temperatura.

Nas áreas trincadas (AB AT), no decorrer do ensaio, registraram-se deflexões um pouco superiores do que nas áreas não trincadas (AB ANT), sendo que no início do ensaio AB a diferença de deflexão em áreas não trincadas e trincadas era de 15%, e enquanto no término do ensaio essa diferença caiu para 12%.

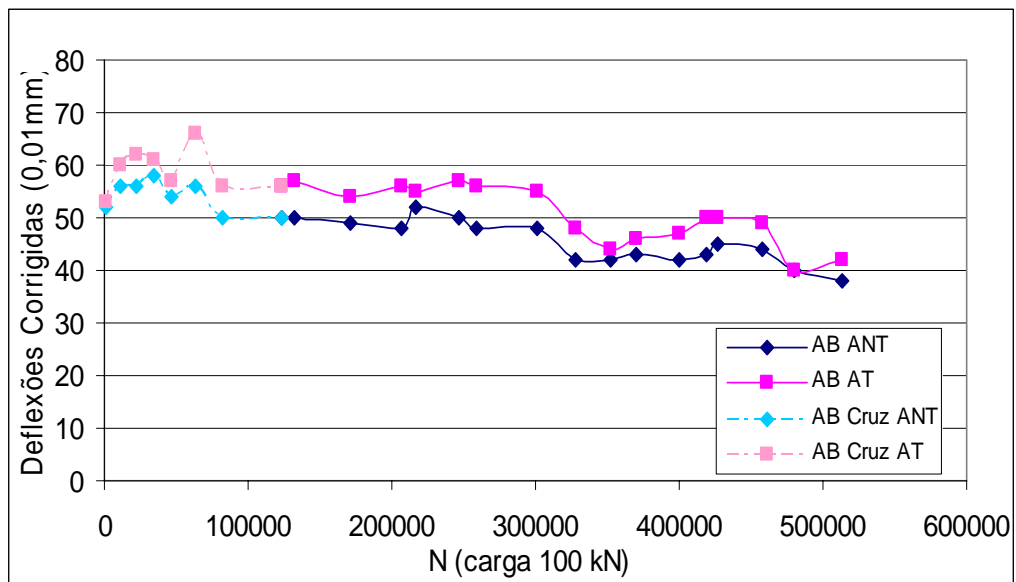


Figura 6.10: Deflexões características corrigidas sob carga de 100 kN

Conforme a Figura 6.10 as deflexões características de carga de eixo também apresentaram valores maiores para as áreas trincadas (AB AT), tanto no início como do final do ensaio. A deflexão característica inicial nas áreas trincadas (AB AT) foi de  $57,3 \times 10^{-2}$  mm e nas áreas não trincadas (AB ANT) foi de  $61 \times 10^{-2}$  mm.

No término do ensaio as deflexões características apresentaram um decréscimo, nas áreas trincadas de 32% e nas não trincadas de 26%.

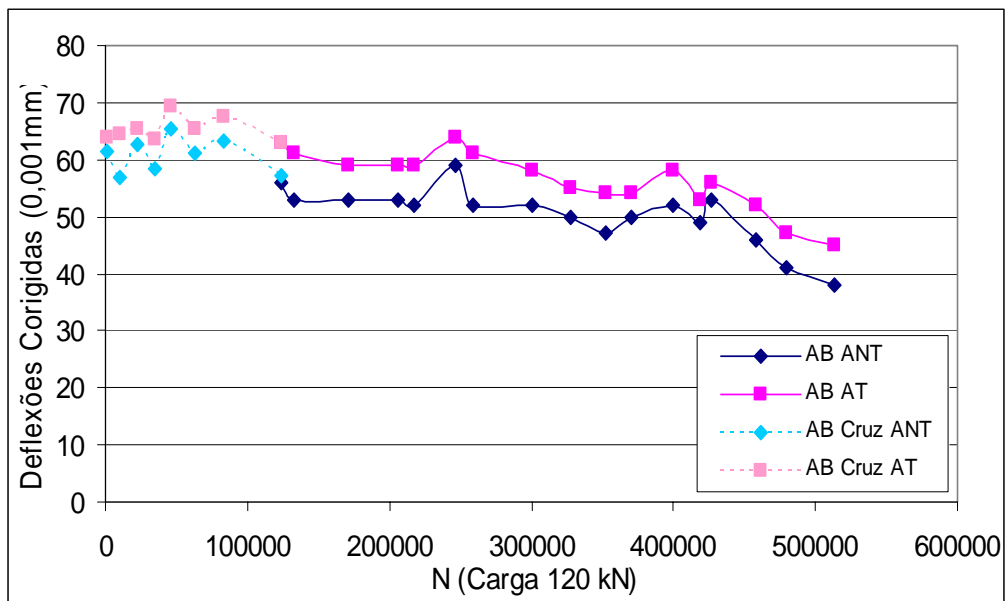


Figura 6.11: Deflexões características corrigidas sob carga de eixo de 120 kN

As deflexões características de carga de eixo de 120 kN também apresentaram valores maiores para as áreas trincadas tanto no início como no final do ensaio.

Sintetizando: para todos os níveis de carga de eixo nas áreas trincadas (AB AT) as deflexões características apresentaram valores maiores do que áreas não trincadas (AB ANT), o que era o esperado.

Verificou-se que as deflexões características sob carga de eixo de 120 kN foram maiores do que para outros níveis de carga de eixo estudados, devido a maior pressão de inflação dos pneus.

Percebeu-se que as deflexões médias não corrigidas foram superiores às deflexões características corrigidas, para todos os níveis de carga de eixo Ou seja, a consideração da temperatura do pavimento reduziu as deflexões.

A Figura 6.12 mostra um comparativo entre deflexões características (método da AASTHO, 1993) em áreas não trincadas (ANT) nos recapeamentos em asfalto-borracha (AB), em asfalto-convencional estudado por Azambuja (2004) e em asfalto-convencional estudado por Cruz (2005); todas medidas com carga de eixo de 100 kN.

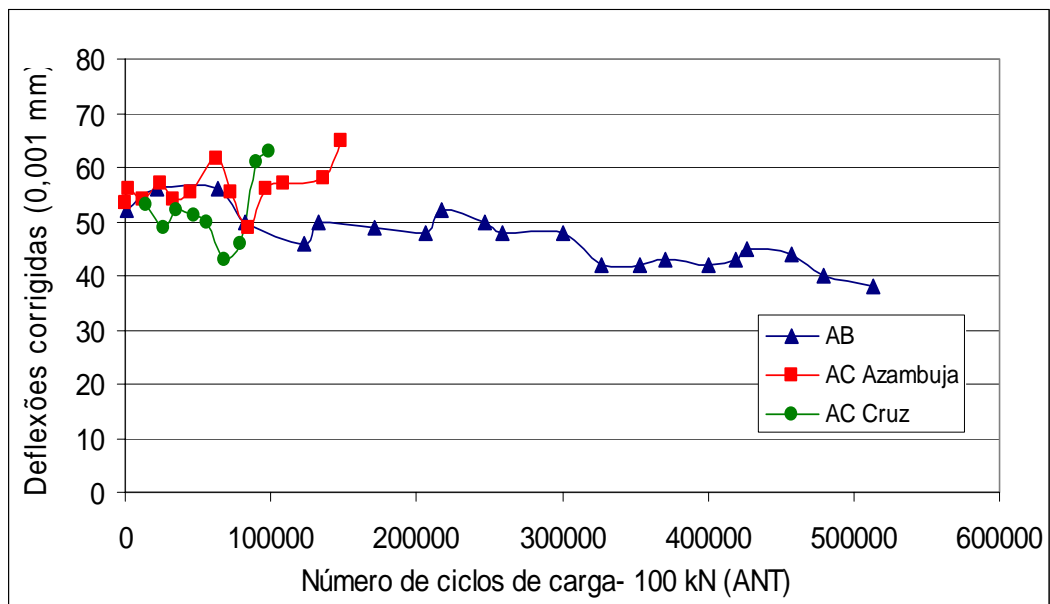


Figura 6.12: Comparativo das deflexões características nas ANT dos recapamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz.

Observa-se que:

- Nos inícios dos ensaios em todos os recapamentos (AB, AC Azambuja e AC Cruz) as deflexões eram praticamente iguais ( $52 \times 10^{-2}$  mm);
- No recapamento AC Cruz as deflexões características experimentaram redução inicial, seguida de um aumento progressivo e significativo após 80.000 ciclos de carga, sugerindo a fadiga do pavimento. Já no recapamento AB as deflexões características aumentaram no início da solicitação, diminuindo após 60.000 ciclos de carga, continuando com o mesmo nível de deflexão até 300.000 ciclos, depois diminuindo. Já no recapamento AC Azambuja as deflexões oscilaram de 50 a  $60 \times 10^{-2}$  mm até aproximadamente 140.000 ciclos de carga; depois aumentando;
- No final dos ensaios a maior deflexão característica foi medida no recapamento AC Azambuja ( $65 \times 10^{-2}$  mm) após 150.000 ciclos de carga. No recapamento AB foi medida o menor valor ( $38 \times 10^{-2}$  mm) após 513.000 ciclos e no recapamento AC Cruz a deflexão final foi  $63 \times 10^{-2}$  mm.



A Figura 6.13 mostra um comparativo das deflexões características nas áreas trincadas (AT) entre os mesmos sob carga de eixo de 100 kN.

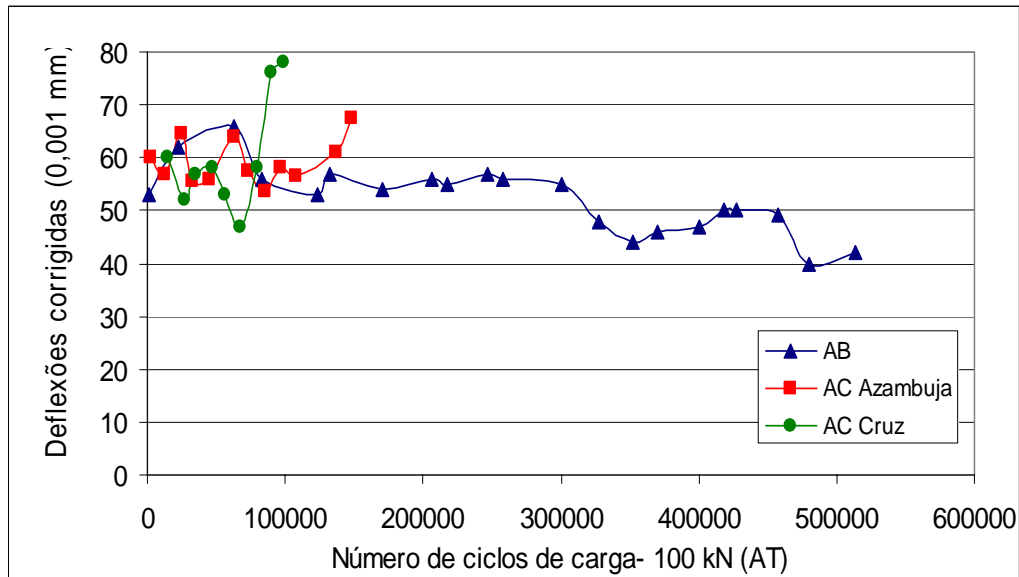


Figura 6.13: Comparativo das deflexões características nas AT dos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz

Compararam-se as deflexões características nas áreas trincadas (AT) dos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz, como mostra a Figura 6.13, com carga de eixo de 100 kN verificou-se que:

- No início do ensaio os recapeamentos (AB, AC Azambuja e AC Cruz) apresentaram deflexões diferentes, como: AC Azambuja e AC Cruz foram de  $60 \times 10^{-2}$  mm e AB apresentou um valor mais baixo de  $53 \times 10^{-2}$  mm;
- No recapeamento AC Cruz as deflexões características sofreram uma redução inicial, seguida de um aumento progressivo e significativo após 80.000 ciclos de carga, sugerindo a fadiga do pavimento. No recapeamento AB as deflexões características aumentaram no início do período de solicitação, diminuindo após 60.000 ciclos de carga, continuando com o mesmo nível de deflexão na faixa de  $50$  a  $60 \times 10^{-2}$  mm até 300.000 ciclos, depois diminuindo até o final do ensaio. Já no recapeamento AC Azambuja as deflexões ficaram entre  $65$  e  $75 \times 10^{-2}$  mm até aproximadamente 137.000, posteriormente aumentado;

- No final do ensaio a deflexão característica de maior valor foi no recapeamento AC Cruz com  $78 \times 10^{-2}$  mm após 98.000 ciclos de carga. O recapeamento AB apresentou a menor deflexão característica ( $42 \times 10^{-2}$  mm aos 513.000 ciclos de carga), sendo que a deflexão característica final do estudo de Azambuja foi de  $68 \times 10^{-2}$  mm após aproximadamente  $N= 148.000$  ciclos de carga.

No global observa-se que o recapeamento em asfalto-borracha teve as menores deflexões e que entre os dois recapeamentos em concreto asfáltico convencional o melhor desempenho foi o estudado por Azambuja (2004).

No final do período de ensaios retiram-se corpos de prova (CPs) da área trafegada da pista com recapeamento com asfalto-borracha e procedeu-se uma nova determinação do grau de compactação. A Tabela 6.1 mostra o grau de compactação dos CPs extraídos do pavimento.

Tabela 6.1: Grau de compactação dos CPs extraídos no final do período de ensaios

Identificação dos CPs	Grau de compactação (%)
1a	96
1b	96
2a	95
2b	94
3a	93
3b	95
4a	94
4b	94
5a	95
5b	95
6a	98
6b	97
Média	95
Desvio Padrão	1,4

De acordo com a Tabela 6.1 conclui-se que quanto maior o grau de compactação dos corpos de prova extraídos da pista menor será o índice de vazios do pavimento analisado.

### 6.4.2 Bacias deflectométricas e módulos retroanalizados

Foram feitos levantamentos das bacias deflectométricas semanalmente com um deflectógrafo (viga eletrônica), sob 2 níveis de carregamento (82 kN e 100 kN).

As Figuras 6.14 e 6.15 mostram as bacias deflectométricas com a viga eletrônica sob carga de eixo de 82 kN para as áreas não trincadas (ANT) e áreas trincadas (AT).

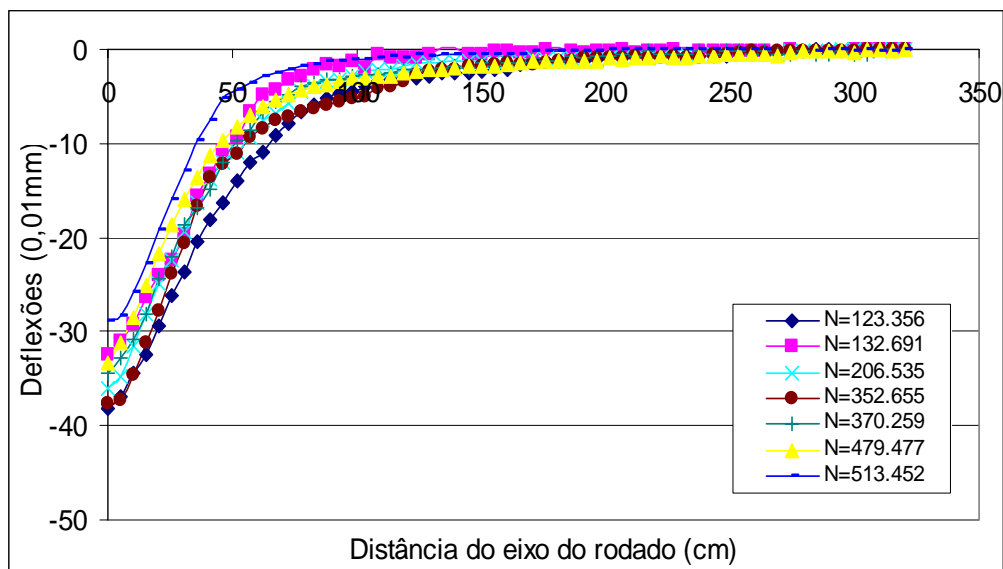


Figura 6.14: Bacias deflectométricas nas ANT sob carga de eixo de 82 kN

De acordo com a Figura 6.14, as bacias deflectométricas nas áreas não trincadas tiveram valores de deflexão máxima entre 29 e 38 x 10<sup>-2</sup> mm. No último ensaio (N= 513.452 ciclos de carga) a deflexão apresentou um decréscimo de 24 % em relação ao primeiro ensaio realizado (N= 123.356 ciclos de carga).

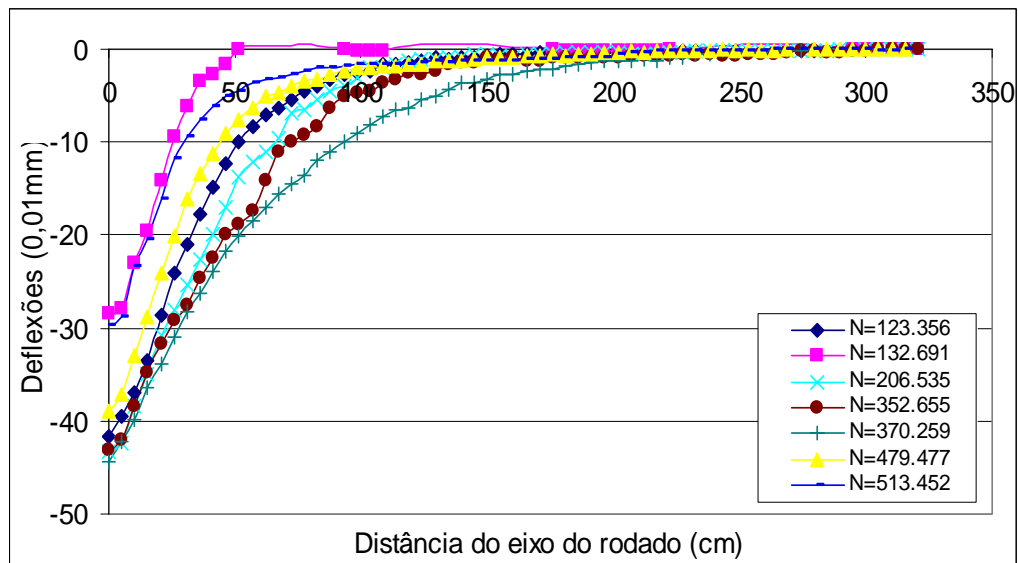


Figura 6.15: Bacias deflectométricas nas AT sob carga de eixo de 82 kN

Percebe-se na Figura 6.15 que as bacias deflectométricas sob carga de eixo de 82 kN nas áreas trincadas (AT) tiveram valores de deflexão máxima entre  $28$  e  $44 \times 10^{-2}$  mm. Notou-se que a faixa de valores das áreas trincadas (AT) foi maior do que nas áreas não trincadas (ANT), talvez devido ao trincamento imposto nestas áreas.

As Figuras 6.16 e 6.17 mostram as bacias deflectométricas com a viga eletrônica sob a carga de eixo de 100 kN para áreas trincadas (AT) e áreas não trincadas (ANT).

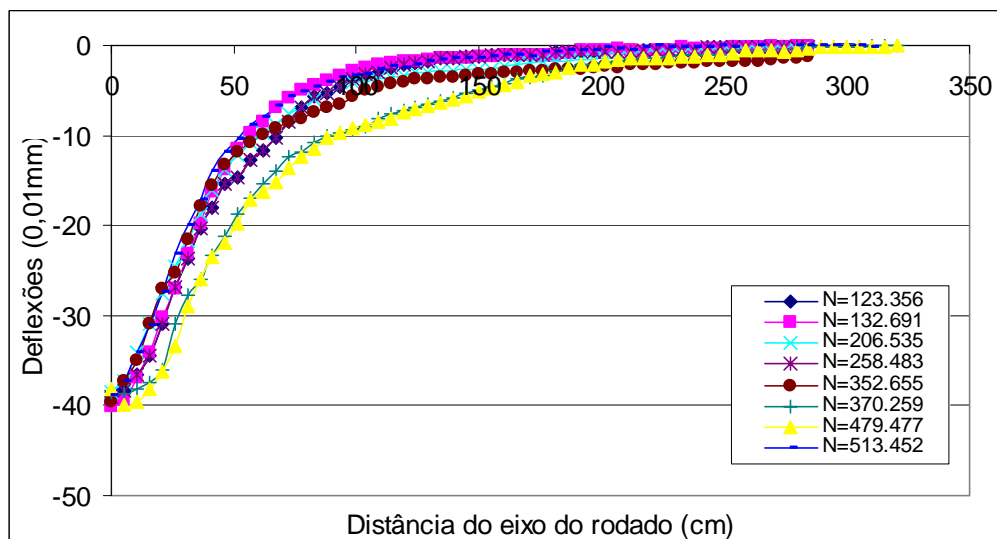


Figura 6.16: Bacias deflectométricas nas ANT sob carga de eixo de 100 kN

Observou-se que sob a carga de eixo de 100 kN nas áreas não trincadas (ANT) as bacias foram mais semelhantes e que para todas as bacias a deflexão máxima foi de  $40 \times 10^{-2}$  mm.

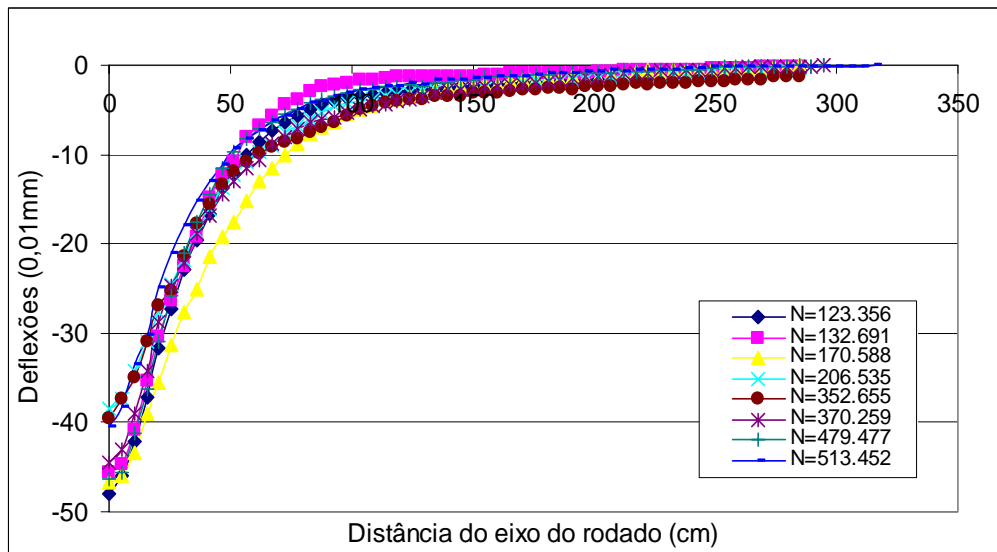


Figura 6.17: Bacias deflectométricas nas AT sob carga de eixo de 100 kN

Já na Figura 6.17 observam-se bacias de maior variação entre bacias medidas em áreas trincadas (AT), com valores de deflexão máxima entre  $39$  e  $48 \times 10^{-2}$  mm.

A Figura 6.18 apresentam bacias deflectométricas de carga de eixo de 82 kN e 100 kN, para o mesmo número de ciclos de carga (N).

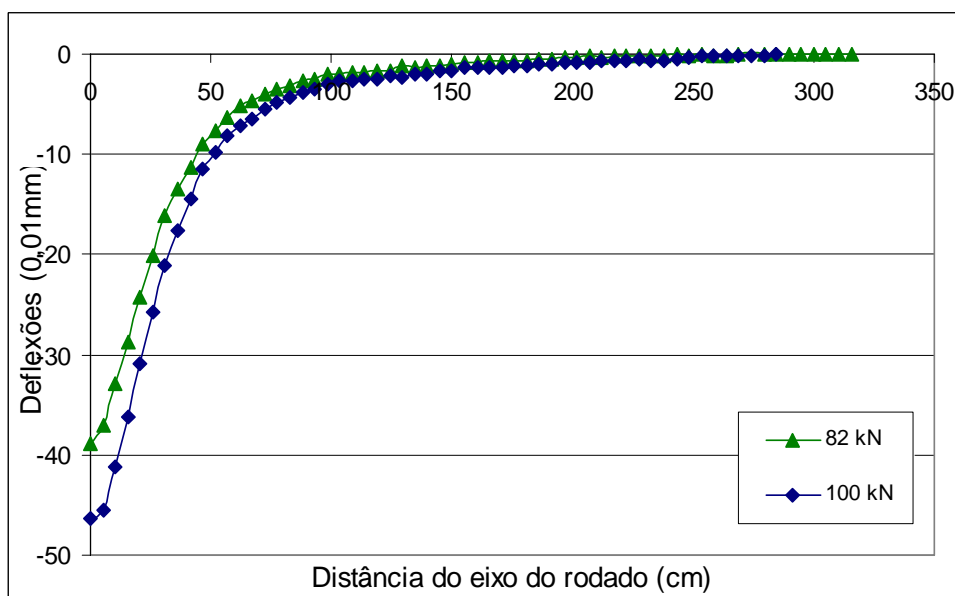


Figura 6.18: Bacias deflectométricas sob cargas de eixo de 82 e 100 kN para N= 479.477

Nota-se que na parte inicial da bacia (ate 1 m de distância entre a roda e o sensor do deflectógrafo) as deflexões são maiores sob a carga de 100 kN, como era de esperar-se. Contudo para distâncias maiores as bacias convergem, sugerindo que o módulo do subleito não foi muito sensível à variação de carga.

A Tabela 6.2 apresenta as deflexões medidas com a viga Benkelman e com a viga eletrônica sob cargas de eixo de 82 kN e 100 kN.

Tabela 6.2: Deflexões medidas com a viga Benkelman e viga eletrônica

N	Deflexões ( $\times 10^{-2}$ mm)			
	Viga Benkelman		Viga eletrônica	
	82 kN	100 kN	82 kN	100 kN
132.691	46,6	51,5	30,5	42,9
352.655	41,1	43,9	40,4	44,6
370.259	41,1	60,2	39,4	41,7
479.477	32,4	40,2	36,1	43,2
513.452	33,9	41,9	29,3	39,7

Observa-se que as deflexões medidas com a viga eletrônica apresentam valores menores do que as deflexões com a viga Benkelman, pois:

- No ensaio com a viga Benkelman o rodado, cujo centro de simetria coincide com a ponta da viga, caracterizando um ensaio quase estático. Já no ensaio com a viga eletrônica ao passar pelo LVDT o rodado está em movimento, ou seja, o ensaio inicia antes da seção. Como no concreto asfáltico é um material visco-elástico, o seu módulo de resiliência depende da velocidade de sollicitação. No caso de deflectógrafo digital, a velocidade de carga é maior, resultando em maiores módulos e menores deflexões.

### 6.4.3 Raio de curvatura

Como elemento complementar nas análises do levantamento deflectométrico, foram calculados os raios de curvatura, parâmetro usado como indicativo de capacidade do pavimento em distribuir as tensões geradas pelo tráfego.

Dentre diversos métodos existentes para a determinação do raio de curvatura, o adotado foi do DNER (1994), de acordo com a equação 6.1.

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (6.1)$$

Onde:

R = Raio de curvatura da deformada, em metros;

$D_0$  = Deflexão máxima, em centésimos de mm;

$D_{25}$  = Deflexão a 25 cm da ponta da viga, em centésimos de mm.

O raio de curvatura é afetado pelas características elásticas dos componentes da parte superior da estrutura, ou seja, do próprio revestimento e a base. É complexo estabelecer um valor crítico para o raio de curvatura porque cada estrutura apresenta características particulares. Pinto (2002) sugere que um raio de curvatura inferior a 100 m, sob carga padrão, é um indício de comprometimento estrutural, ou seja, os módulos elásticos das camadas superiores do pavimento estão abaixo do que o desejável.

As Figuras 6.19 e 6.20 apresentam os raios de curvatura sob cargas de eixo de 82 kN e 100 kN, nas áreas trincadas (AT) e nas áreas não trincadas (ANT).

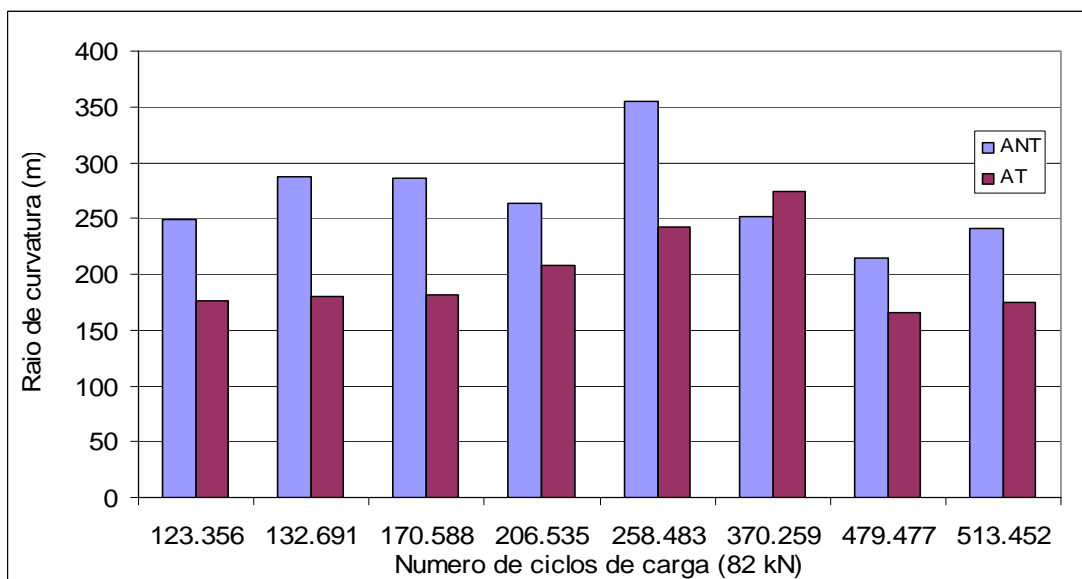


Figura 6.19: Raio de curvatura sob carga de eixo de 82 kN

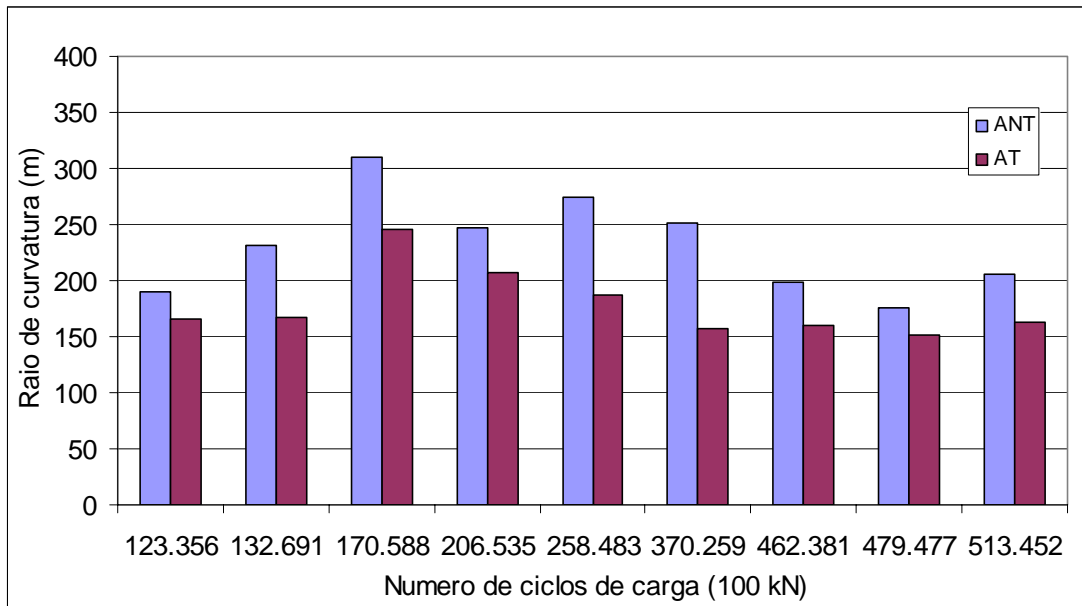


Figura 6.20: Raio de curvatura sob carga de eixo de 100 kN

Nota-se que todos os raios de curvaturas estudados tiveram valores acima de 100 m, tanto nas áreas trincada (AT) como nas áreas não trincadas (ANT) em ambas as carga de eixo (82 kN e 100 kN) com isso não indica comprometimento estrutural.

Os valores mais baixos de raio de curvatura foram medidas as áreas trincadas (AT). O valor mais baixo apresentado pelo raio de curvatura, sob carga 82 kN, foi 166 m na AT e o mais valor apresentado foi 354 m na ANT.

O fato de que os raios de curvatura não terem variado de forma acentuada no decorrer do ensaio sugere que os módulos de resiliência das camadas superiores do pavimento (especialmente das camadas asfálticas) também não sofreram modificações muito significativas. Assim a redução das deflexões após os 450.000 ciclos de carga parece ter sido causada mais pelo aumento do módulo do subleito (mais seco, em maior sucção) do que pelo enrijecimento dos revestimentos asfálticos.

#### 6.4.4 Efeito das temperaturas no comportamento elástico das misturas

A contribuição de cada camada do pavimento na deflexão em três diferentes temperaturas (10, 25 e 40 °C) foi analisada em auxílio do programa ELSYM5, a partir dos seguintes dados:



- Módulo de resiliência da camada de recapeamento de asfalto-borracha: MR (t= 10 °C)= 16.900 MPa, MR (t= 25 °C)= 3.893 MPa e MR (t= 40 °C)= 790 MPa. Estes valores de MR foram obtidos em ensaios de laboratório. O coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) foi adotado igual a 0,30;
- Módulo de resiliência da camada de asfalto-convencional subjacente: MR (t= 10 °C)= 6.202 MPa, MR (t= 25 °C)= 3.747 MPa e MR (t= 40 °C)= 1.592 MPa. Estes valores foram relatados por Cardoso e Ceratti (2004). O coeficiente de Poisson ( $\mu$ )= 0,30;
- Módulo de resiliência da camada de base granular para as 3 temperaturas (10, 25 e 40 °C): 70 MPa; e coeficiente de Poisson ( $\mu$ )= 0,35;
- Módulo de resiliência do subleito para as três temperaturas (10, 25 e 40 °C): 230MPa; e coeficiente de Poisson ( $\mu$ )= 0,45.

Esta análise também foi feita com o objetivo de permitir um melhor comparativo no desempenho dos recapeamentos desta dissertação e os ensaiados por Azambuja (2004) e Cruz (2005).

A Tabela 6.3 mostra as deflexões encontradas na análise feita pelo programa Elsym5 para 3 níveis de temperaturas (10, 25 e 40 °C).

Tabela 6.3: Deflexões calculadas pelo programa Elsym5

Z (cm)	Deflexões ( $10^{-2}$ mm)		
	t= 10 °C	t= 25 °C	t= 40 °C
0	38,6	51,3	68,5
5	38,6	51,3	67,7
9	38,2	50,7	66,7
39	15,3	16,8	20

Observa-se na Tabela 6.3, que maior a temperatura maior a deflexão. O maior valor de deflexão apresentado na análise ( $68,5 \times 10^{-2}$  mm) foi na maior temperatura (t= 40 °C) no recapeamento de asfalto-borracha.

As Figuras 6.21 a 6.23 apresentam a contribuição das camadas na deflexão com as correspondentes temperaturas.

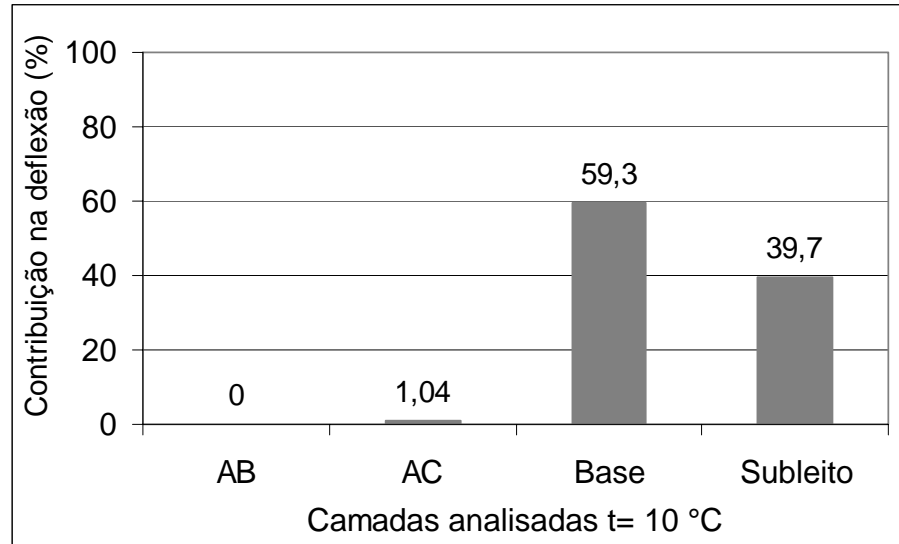


Figura 6.21: Contribuição das camadas na deflexão calculadas a  $t= 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Nota-se na Figura 6.21 que as camadas asfálticas, tanto a camada do recapeamento de asfalto-borracha (AB) como a camada de asfalto convencional (AC), tem pequena contribuição no valor total da deflexão. Já na camada de base e o subleito a maior contribuição, sendo que a camada de base de brita graduada foi a que apresentou maior contribuição em relação às outras camadas.

O padrão de contribuição observado na Figura 6.21 se mantém nas Figuras 6.22 e 6.23, correspondentes a temperaturas de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

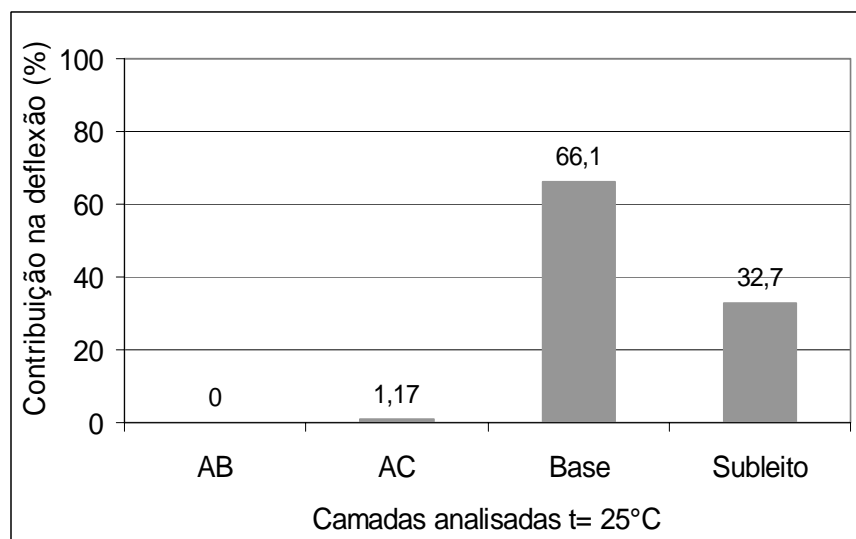


Figura 6.22: Contribuição das camadas na deflexão calculada a  $t= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

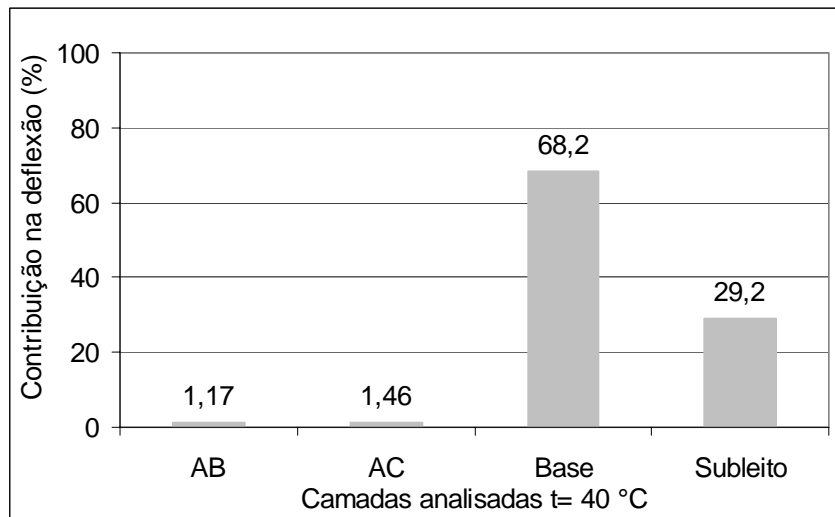


Figura 6.23: Contribuição das camadas na deflexão calculada a  $t= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Os aumentos das deflexões e das contribuições da camada de base e do subleito nas deflexões são provavelmente são devidos à diminuição dos módulos de resiliência das camadas asfálticas, o que faz que maiores tensões sejam transmitidas às camadas inferiores (base e subleito).

#### 6.4.5 Tensões medidas na interface das camadas asfálticas

As tensões que foram geradas na interface do pavimento existente com o recapeamento de asfalto-borracha foram medidas por células de tensão.

A célula de tensão para verificação das tensões horizontais apresentou um pequeno tempo de vida nesta pesquisa, (o correspondente entre 128.000 e 144.000 ciclos de carga aproximadamente). Posteriormente a célula de tensão deixou de funcionar.

As tensões geradas pela carga de tráfego foram calculadas através da Equação 6.2, fornecida por Gonçalves (2002).

$$\sigma = \left( \frac{L_0 \times 1000 \times k}{g \times A_1 \times 10} \right) \quad (6.2)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão medida (MPa)

$L_0$  = leitura (milivolt)

$K$  = sensibilidade ( $\mu\text{V}/\text{V}$ )

$g$  = ganho de amplificação

$A_1$  = voltagem de excitação (V)

A Figura 6.24 mostra os resultados das tensões horizontais obtidas com a evolução dos ciclos de carga.

Observa-se, de acordo com a Figura 6.24, que a tensão horizontal inicial nesta pesquisa (AB) foi de 260 kPa e esta tensão manteve-se praticamente estável num curto período ( $N= 129.000$  a 139.000 ciclos de carga). Após este período a tensão horizontal teve um brusco decréscimo, sugerindo dano do sensor.

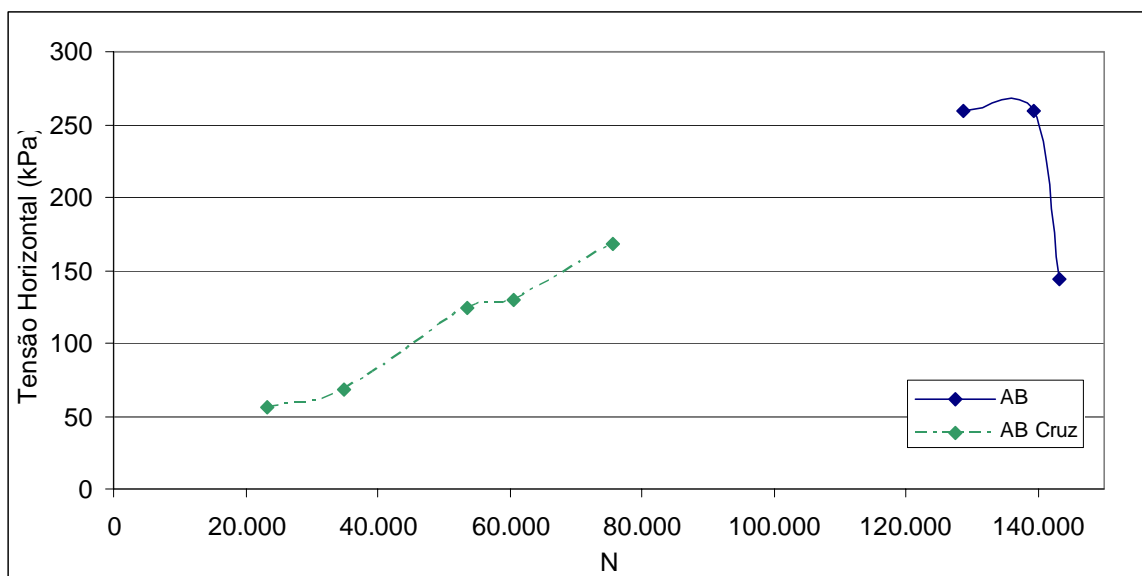


Figura 6.24: Tensões horizontais geradas por carga de eixo de 100 kN

### 6.4.6 Deformações

Para melhor compreender o comportamento mecânico da estrutura ensaiada foram instalados na face inferior do recapeamento em asfalto-borracha, dois *strain gages* nas direções transversal, longitudinal e  $45^\circ$  em relação ao deslocamento do trem de cargas do simulador de tráfego.

Através da Equação 6.2 foi feita a conversão das leituras dadas em diferenças de tensão elétrica para microstrain ( $10^{-6}$  m/m).

$$\varepsilon = \frac{4}{GF} \times \frac{\left(\frac{\Delta V}{A_0}\right)}{V_{exc}} \times 1000 \quad (6.2)$$

Onde:

$\varepsilon$  = deformação ( $\mu$ strain)

$\Delta V$  = leitura do *strain gage* (mV)

$A_0$  = ganho de amplificação (adimensional)

GF (Gage Factor) = 2 (fornecido pelo fabricante)

$V_{exc}$ . (voltagem de excitação) = 6V

As Figuras 6.25 a 6.27 apresentam as deformações horizontais nas direções longitudinal, transversal e 45° dos estudos desta pesquisa (AB), estudo de Cruz (2005).

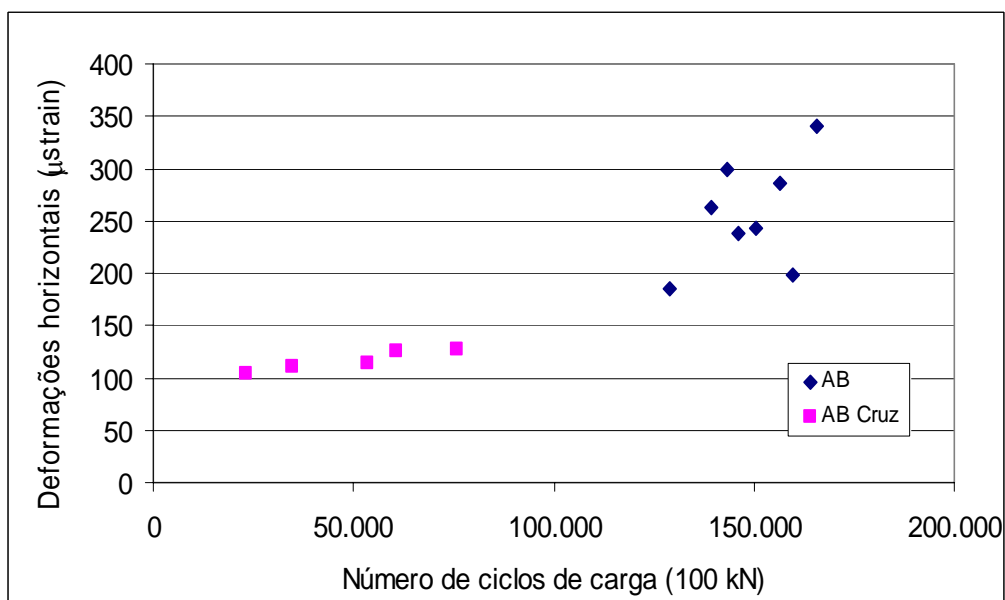


Figura 6.25: Deformações horizontais na direção longitudinal

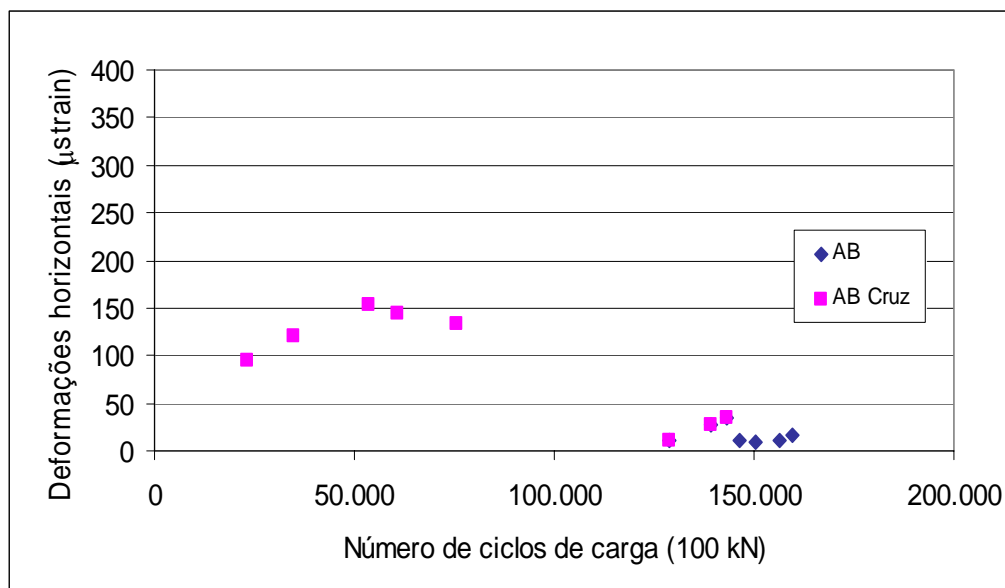


Figura 6.26: Deformações horizontais na direção transversal

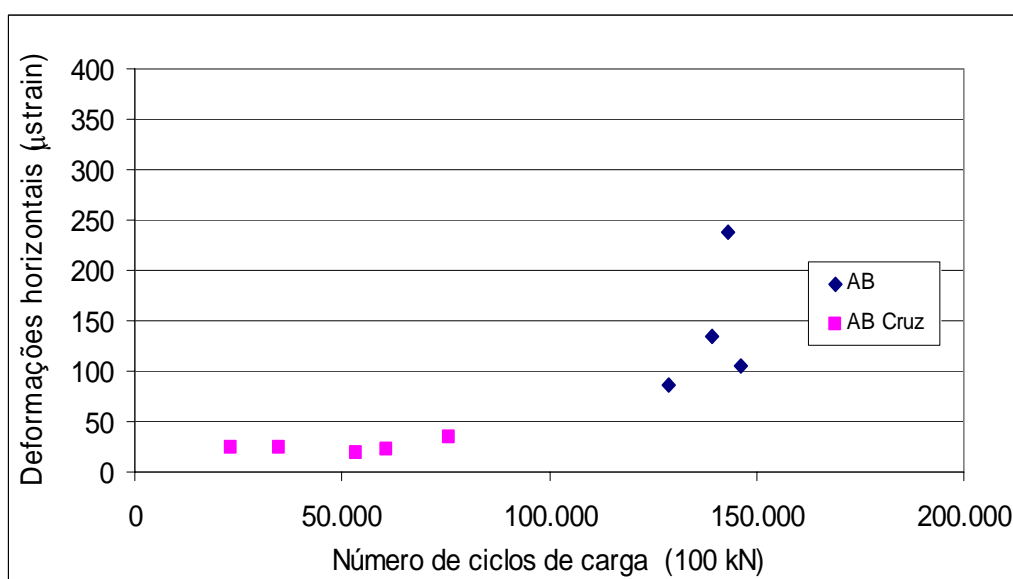


Figura 6.27: Deformações horizontais na direção 45°

Observa-se que as deformações longitudinais e a 45° aumentaram significativamente após 139.000 ciclos de carga, mas o mesmo não acontecem com as deformações transversais. Estas últimas mantiveram um nível semelhante ao registrado por Cruz (2005). O efeito das deformações transversais terem diminuído, enquanto as outras aumentavam pode indicar uma marcante anisotropia do material e/ ou indício de falha no sensor ou no sistema de aquisição de dados.

A Tabela 6.4 apresenta as deformações de extensão ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  e  $\epsilon_{xy}$ ) medidas na interface entre o revestimento antigo e o recapeamento, bem como as calculadas nas direções principais ( $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ ).

O cálculo das deformações nas direções principais ( $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ ) é necessário por trata-se de um problema de elasticidade bidimensional no qual os eixos principais (nos quais a tensão cisalhante é nula) não coincidem necessariamente com as direções longitudinal e transversal. Conseqüentemente a análise é feita em função de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  e não em função de  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ .

As deformações podem ser de extensão, denotando que a fibra inferior do recapeamento as tensões horizontais são de tração.

Tabela 6.4: Deformações medidas e calculadas na estrutura

N	t (°C)	$\epsilon_x$ ( $\mu$ strain)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ strain)	$\epsilon_{xy}$ ( $\mu$ strain)	$\epsilon_1$ ( $\mu$ strain)	$\epsilon_2$ ( $\mu$ strain)
23.300	25,0	104	95	24	176	127
53.520	26,7	114	154	19	162	106
60.690	27,5	125	144	22	159	11
75.700	26,6	113	139	30	159	93
128.771	20,7	186	12	85	189	12
139.322	21,1	262	28	135	262	27
143.250	20,4	299	35	238	299	35
146.250	19,8	238	-	-	-	-
150.587	19,5	243	-	-	-	-
156.347	23	285	-	-	-	-
159.689	29,3	198	-	-	-	-

Sendo:

$\epsilon_x$  = deformação longitudinal

$\epsilon_y$  = deformação transversal

$\varepsilon_{xy}$  = deformação a 45°

$\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  = deformações nas direções principais

A Figura 6.28 apresenta as deformações principais obtidas com a evolução dos ciclos de carga dinâmica do simulador de tráfego, no estudo desta pesquisa (AB E1 e AB E2).

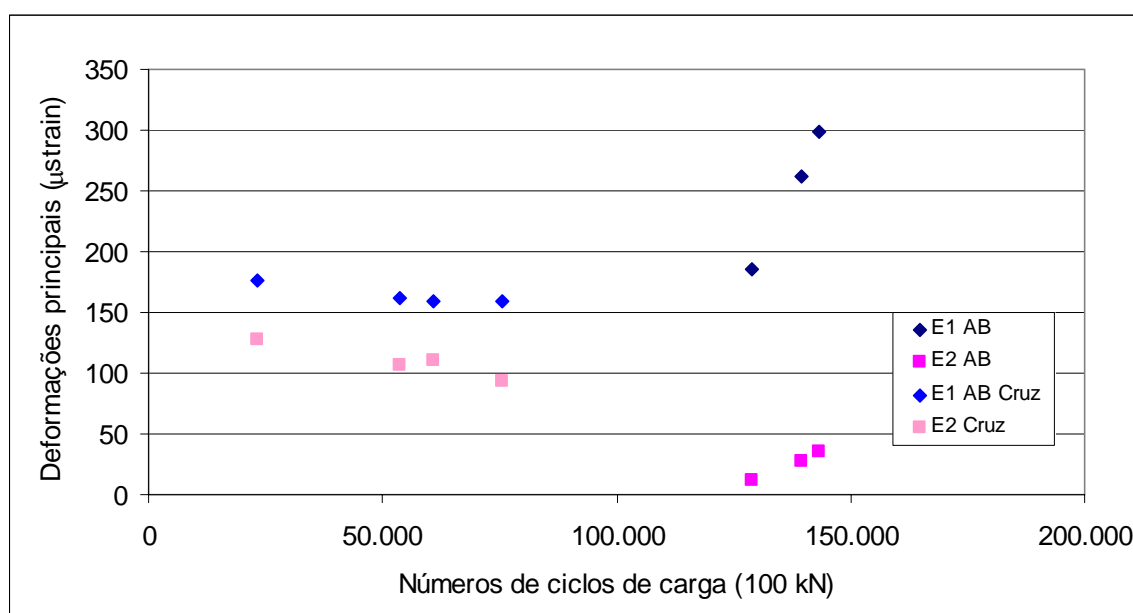


Figura 6.28: Deformações principais obtidas

Realizou-se uma simulação da estrutura do pavimento através do programa Elsym5 com o objetivo de determinar a posição da linha neutra. A Figura 6.29 mostra tensão horizontal correspondendo à profundidade onde resulta a posição da linha neutra no pavimento estudado.

Pela Figura 6.29 analisou-se que a linha neutra do pavimento está numa profundidade de 4,50 cm, ou seja, a linha neutra passa pelo asfalto-borracha. Assim, sendo as deformações horizontais atuantes na fibra inferior de asfalto-borracha são de extensão. Na simulação com o Elsym5 as deformações na interface resultaram de ordem de 40 a 70 μstrains, valores semelhantes às deformações transversais (Figura 6.26), porém muito menores que as longitudinais (Figura 6.25).



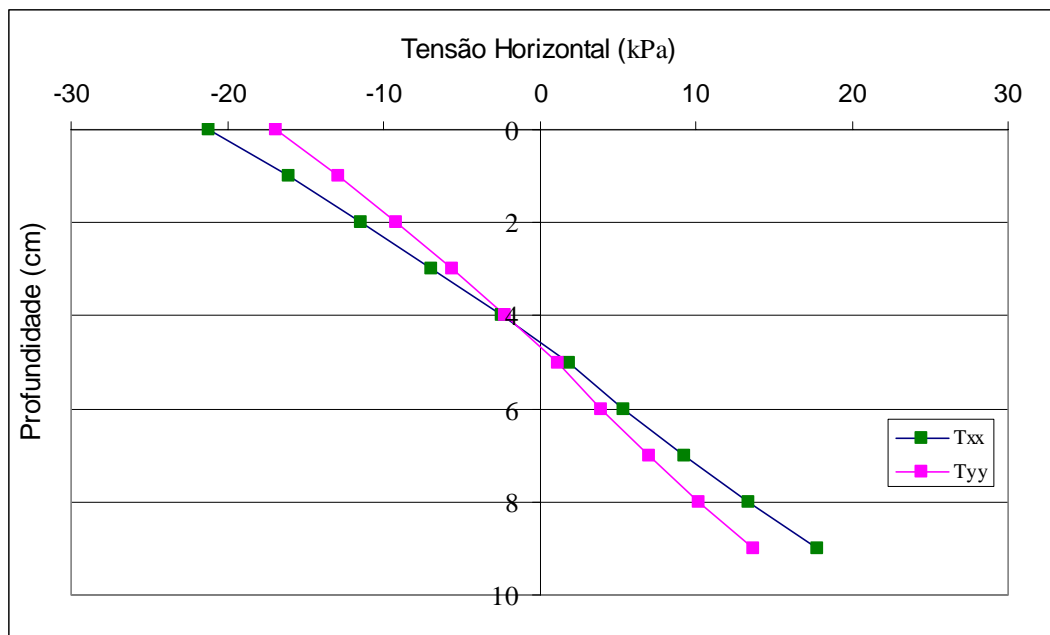


Figura 6.29: Posição da linha neutra no pavimento

Cabe observar que as deformações também são afetadas pela velocidade do carregamento. Na simulação com o Elsym5 empregaram-se módulos de laboratório que representam a rigidez do material asfáltico a velocidades maiores de caminhões ( $v \cong 60$  km/h). Já as deformações medidas pela instrumentação correspondente a velocidades dez vezes menores, e portanto é coerente que sejam bastante superiores às estudadas pelo Elsym5.

## 6.5 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO

### 6.5.1 Deformações Permanentes

O afundamento de trilha de roda é uma depressão percebida na superfície do revestimento, decorrentes das deformações plásticas e das consolidações que ocorrem na estrutura de todas as camadas do pavimento e subleito.

Os afundamentos de trilha de roda (ATR) foram medidos semanalmente com o emprego do transverso-perfilógrafo nas áreas trincadas e nas áreas não trincadas.

A Figura 6.30 mostra a evolução dos afundamentos médios em função do número de solicitações de carga do simulador.

No início deste ensaio, o afundamento de trilha de roda nas áreas trincadas e áreas não trincadas apresentam praticamente o mesmo valor, nas áreas trincadas o ATR igual a 5,7 mm e nas áreas não trincadas o ATR igual a 5,5 mm; ligeira diferença de 3,5 %.

O afundamento de trilha de roda (ATR) médio final nas áreas trincadas foi 8,3 mm e nas áreas não trincadas foi 7,5 mm; uma diferença de 9,7 %.

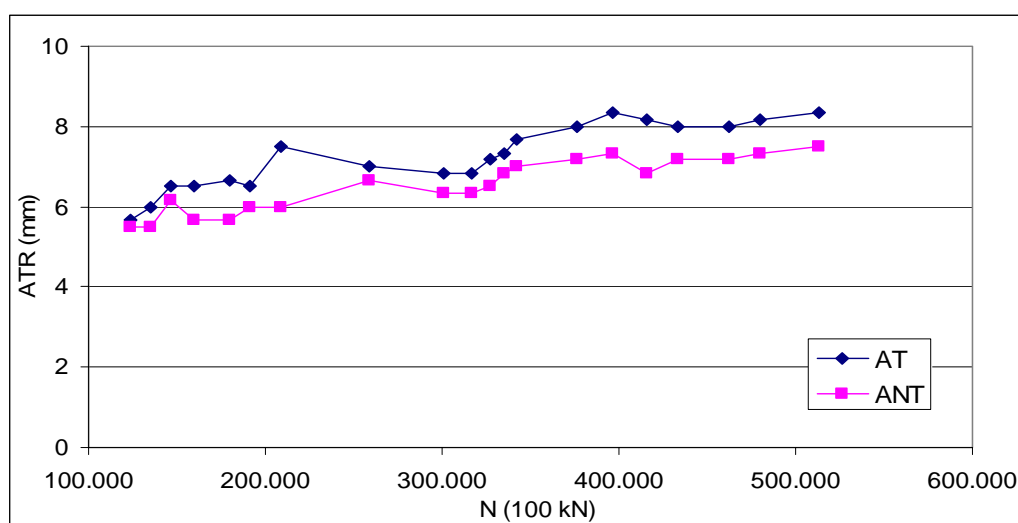


Figura 6.30: Deformações permanentes médias nas ANT e AT

A Figura 6.31 mostra que o afundamento de trilha de roda máximo (ATR Máximo) de início foi de 6,5 mm e teve um aumento de 46%, e, no término do ensaio seu valor era de 9,5 mm.

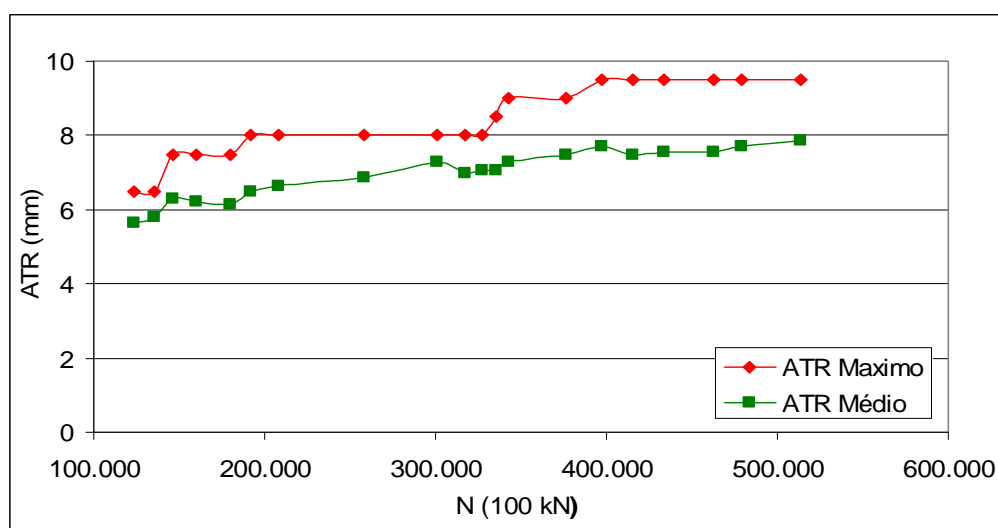


Figura 6.31: Deformação permanente máxima e média

O afundamento de trilha de roda médio (ATR Médio) no início foi de 5,6 mm e teve um acréscimo de 39 %, ou seja, o ATR Médio final foi de 7,8 mm.

Em função da baixa velocidade, o problema de afundamentos de trilha de roda tende a ser crítico em pavimentos experimentais solicitados por simulador de tráfego do tipo linear. Mesmo assim, na estrutura, após  $N= 513.000$  ciclos de carga com 100 kN de carga de eixo, o afundamento médio foi de 7,90 mm.

Foi verificada a evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp) nos afundamentos de trilha de roda (ATR) para as áreas não trincadas e para as áreas trincadas, conforme as Figuras 6.32 e 6.33.

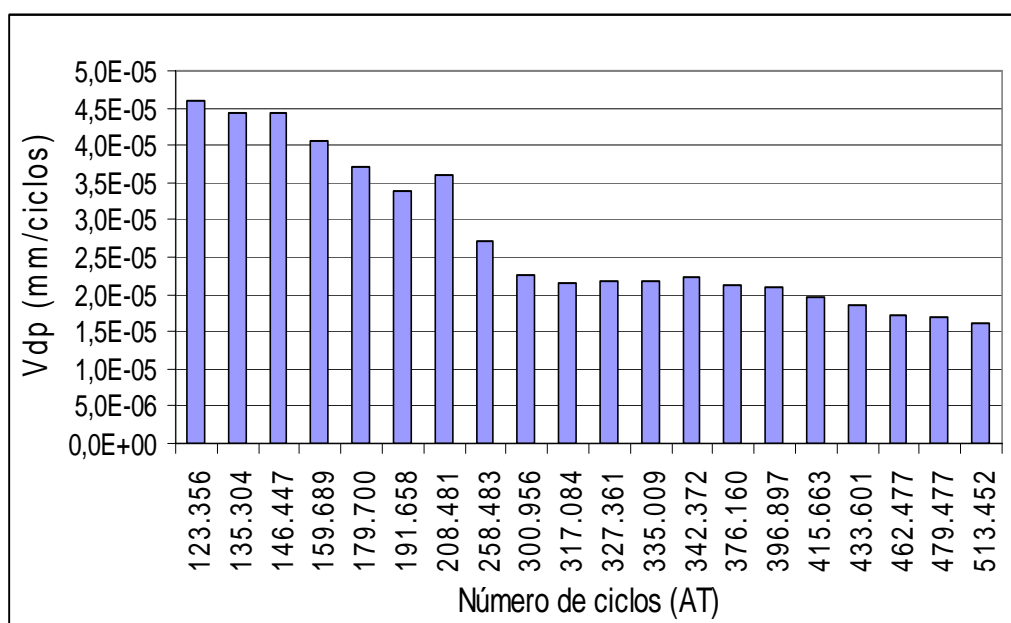


Figura 6.32: Evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp)- AT

Notou-se que a evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp), de acordo com a Figura 6.28, para as áreas trincadas (AT) teve um maior decréscimo até  $N= 208.000$  ciclos de carga aproximadamente. Posteriormente continuou decrescendo porém a taxas menores. O valor máximo de Vdp foi de  $4,6 \times 10^{-5}$  mm/ciclos.

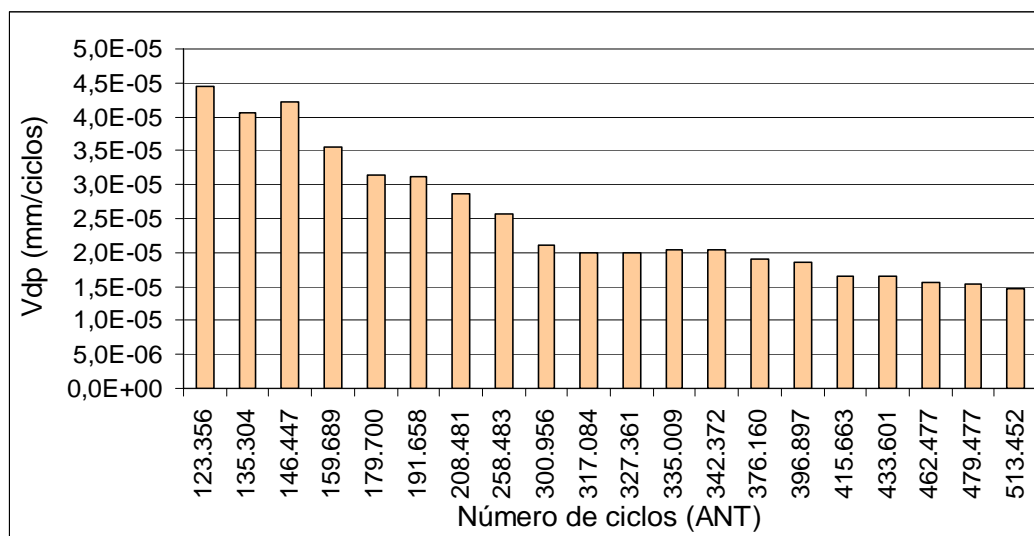


Figura 6.33: Evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp)- ANT

Mostra-se na Figura 6.33 que a evolução da velocidade de deformação plástica (Vdp) para as áreas não trincadas (ANT) apresentou um valor máximo de  $4,49 \times 10^{-5}$  mm/ciclos e um valor mínimo de  $1,5 \times 10^{-5}$  mm/ciclos. As Vdps mostradas nas Figuras 6.32 e 6.33 são muito semelhantes, em ambos casos indicado uma tendência a uma velocidade de deformação permanente constante e de baixo valor ( $1,5 \times 10^{-5}$  mm/ciclos), indicando uma acomodação da estrutura.

A Figura 6.34 mostra um comparativo dos afundamentos de trilha de roda (ATR) com o tráfego nos recapeamentos desta pesquisa AB e nos recapeamentos em concreto asfáltico convencional ensaiados por Azambuja (2004) e Cruz (2005).

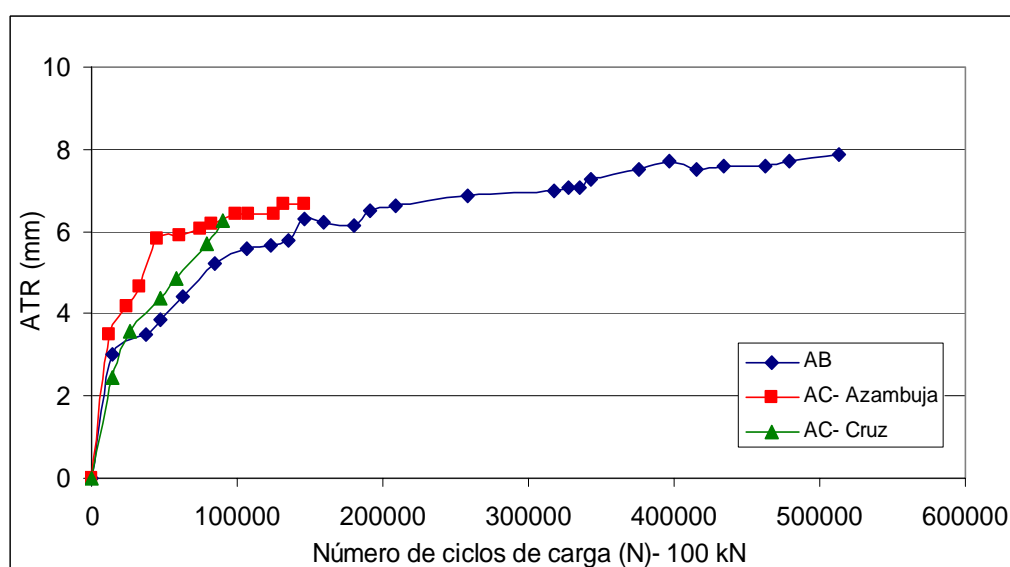


Figura 6.34: Comparativo da ATR dos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz

Observa-se que:

- Os afundamentos de trilha de roda iniciais apresentaram evoluções semelhantes, até aproximadamente 15.000 ciclos de carga;
- No final de cada ensaio, o recapeamento AB foi que apresentou maior afundamento de trilha de roda (7,9 mm), mas este ocorreu após 513.000 ciclos de carga. O recapeamento AC Azambuja teve um ATR final de 6,7 mm enquanto que o recapeamento AC Cruz apresentou o ATR foi 6,3 mm. Contudo, é fundamental salientar que nestes dois últimos recapeamentos, o tráfego foi encerrado muito antes;
- Após aproximadamente 100.000 ciclos de carga, o ATR registrado por Azambuja (2004) e Cruz (2005) eram praticamente idênticos e em torno de 7 mm superiores ao ocorrido no recapeamento em asfalto-borracha.

A Figura 6.35 apresenta um comparativo entre os recapeamentos AB, AC Cruz e AC Azambuja do afundamento de trilha de roda pela raiz do número de ciclos de carga.

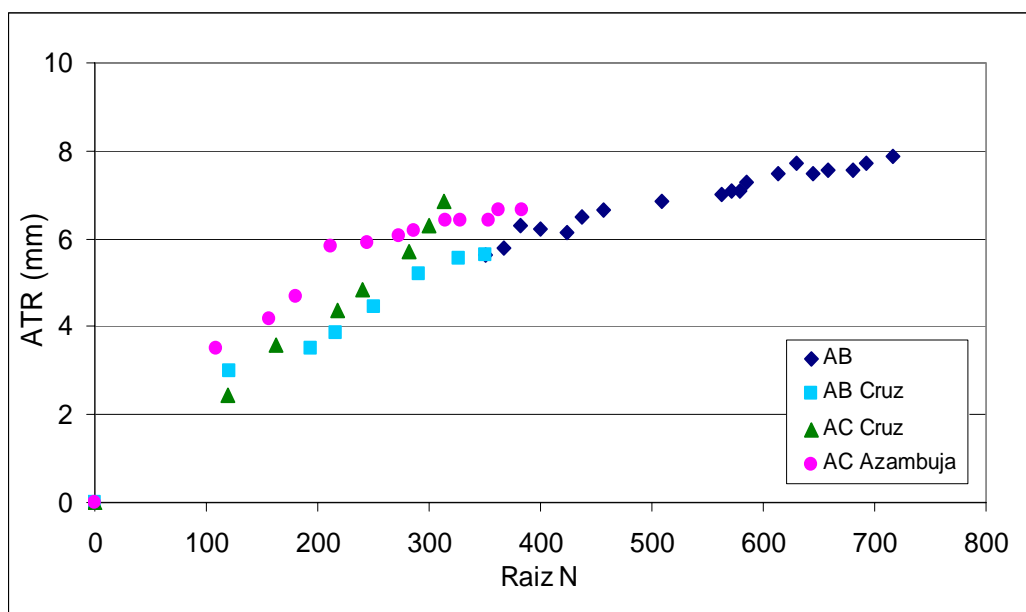


Figura 6.35: Comparativo dos recapeamentos (AB, AC Cruz e AC Azambuja) correlacionados ATR pela raiz de N

De acordo com a Figura, analisou-se o afundamento de trilha de roda (ATR) com a raiz do número de ciclos de carga (N) dos recapeamentos desta pesquisa (AB), do estudo de Cruz (2005) (AC Cruz) e o estudo de Azambuja (2004) (AC Azambuja) que:

- No início de todos os ensaios quando raiz de N igual a 100 a ATR ficou na faixa entre 2 e 4 mm;
- O valor da ATR final menor foi o estudo de AC Azambuja foi 6,7 mm quando raiz de N foi aproximadamente 400, já o maior valor da ATR foi o estudo desta pesquisa que apresentou 7,9 mm quando raiz de N foi aproximadamente 716, mas o estudo de AC Cruz finalizou seu ensaio com uma ATR de 6,9 mm quando raiz de N foi aproximadamente 313, este estudo foi semelhante em relação aos resultados com o estudo de AC Azambuja.

### 6.5.2 Trincamento

Para a avaliação do trincamento foi adotado o critério de Gravidade que consiste em uma medida de comprimento das trincas por área trafegada.

A Figura 6.36 mostra a evolução do trincamento com o tráfego na estrutura ensaiada para as áreas não trincadas (ANT) e áreas trincadas (AT).

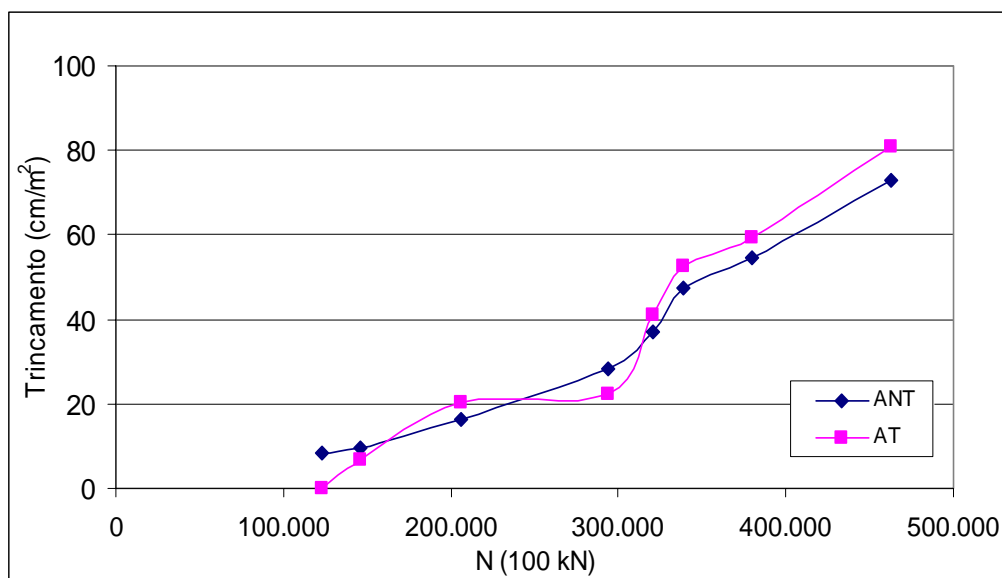


Figura 6.36: Evolução do trincamento nas ANT e AT

Na Figura 6.36, observa-se que nas áreas não trincadas foi maior a densidade de trincamento, ( $80,9 \text{ cm/m}^2$ ), enquanto que nas áreas trincadas a densidade de trincamento foi de  $72,7 \text{ cm/m}^2$ . Este fato, em princípio surpreendente, sugere que houve trincamento por fadiga na

camada subjacente de concreto asfáltico convencional, o qual propagou-se através dos 9 cm de concreto asfáltico convencional e com borracha. Também é possível que algum trincamento tenta se originar na fibra inferior do recapeamento, mas considerando distribuição de tensões da Figura 6.29 é mais possível que o trincamento por fadiga tenha iniciado na camada subjacente.

A Figura 6.37 apresenta a evolução do trincamento total, somando as áreas trincadas e áreas e não trincadas.

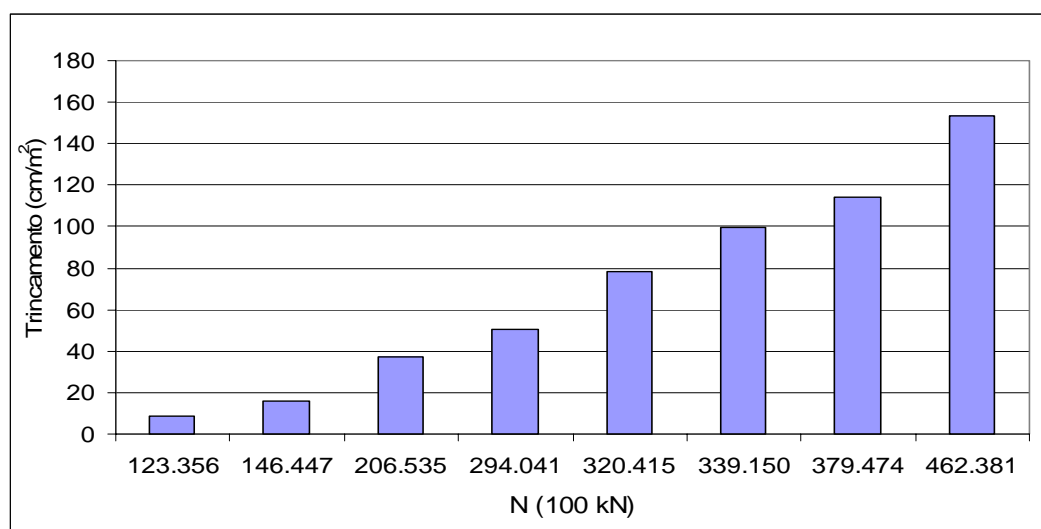


Figura 6.37: Evolução total do trincamento

As Figuras 6.38 e 6.39 exemplificam o surgimento e evolução de trincas na trilha de roda com o tráfego.



Figura 6.38: Foto do trincamento na seção 3 quando N= 205.000



Figura 6.39: Foto do trincamento na seção 3 quando N= 462.000

As Figuras 6.40 a 6.47 permitem uma melhor visualização da evolução do trincamento com o número de ciclos de carga.

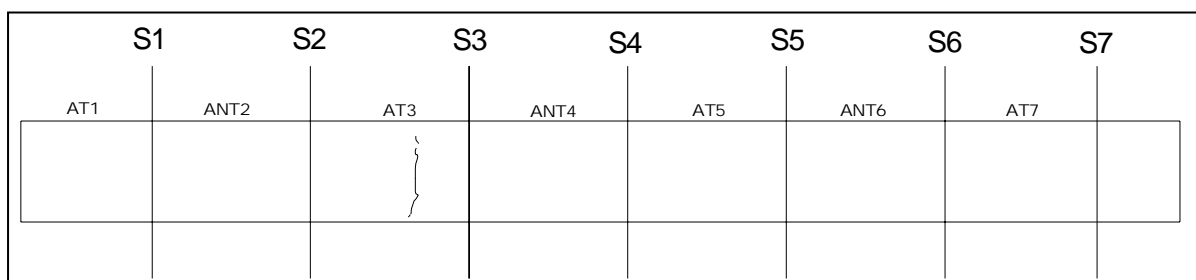


Figura 6.40: Evolução do trincamento N= 123.356- aparecimento do 1º trincamento (Cruz, 2005)

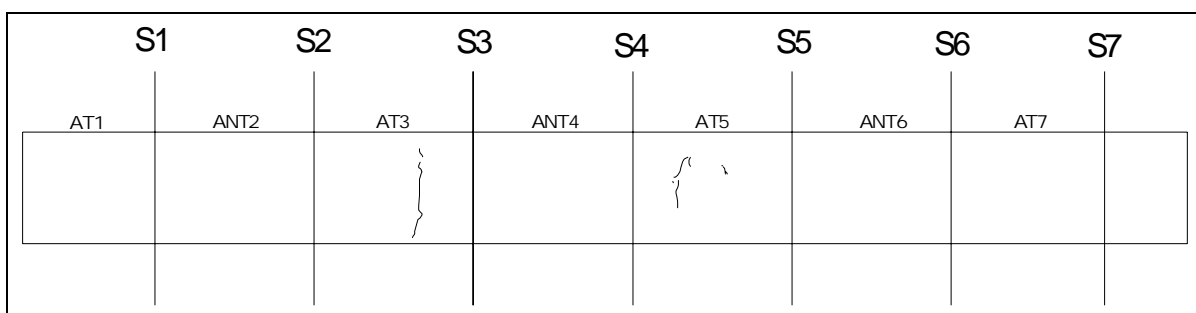


Figura 6.41: Evolução do trincamento N= 146.447



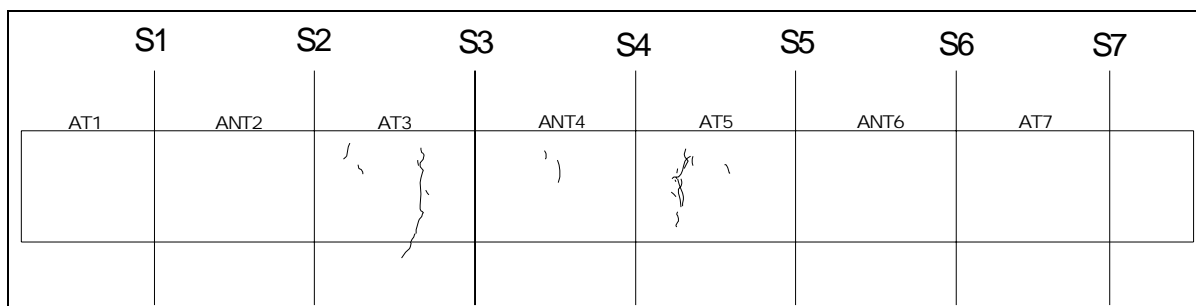


Figura 6.42: Evolução do trincamento N= 206.535

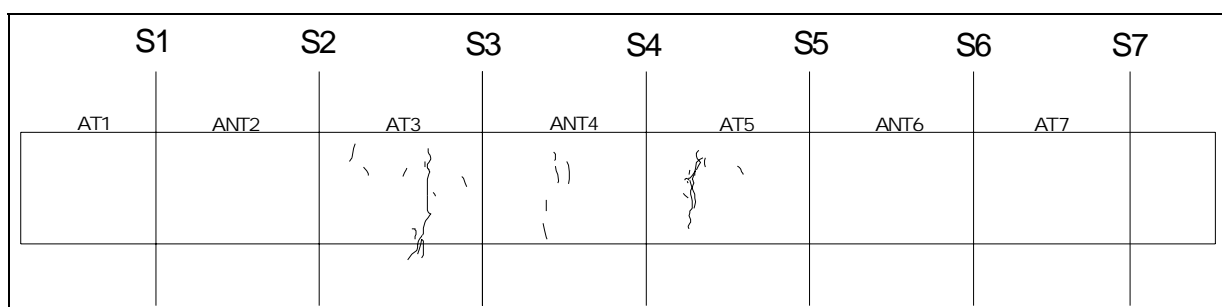


Figura 6.43: Evolução do trincamento N= 294.041

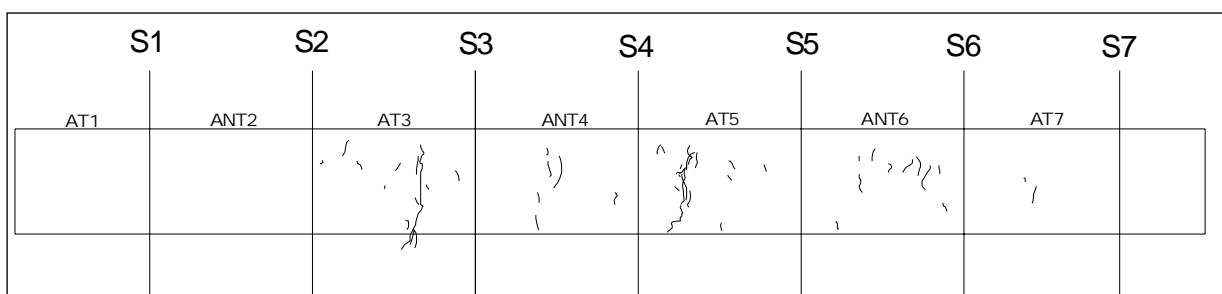


Figura 6.44: Evolução do trincamento N= 320.415

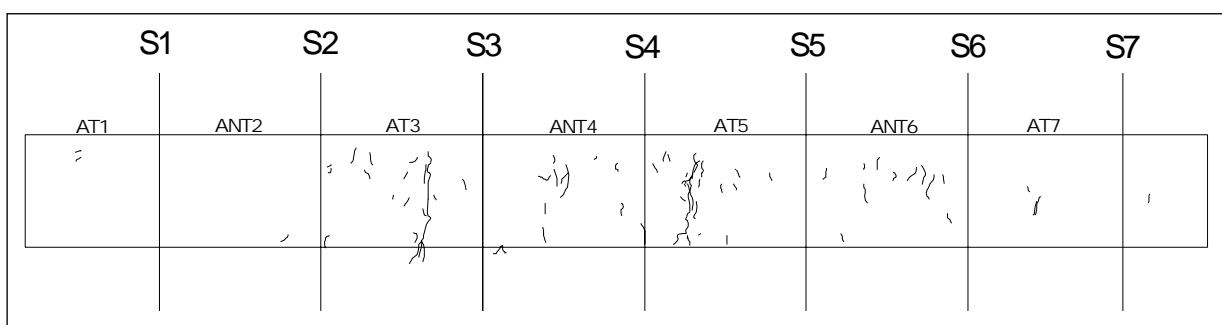


Figura 6.45: Evolução do trincamento N= 339.150

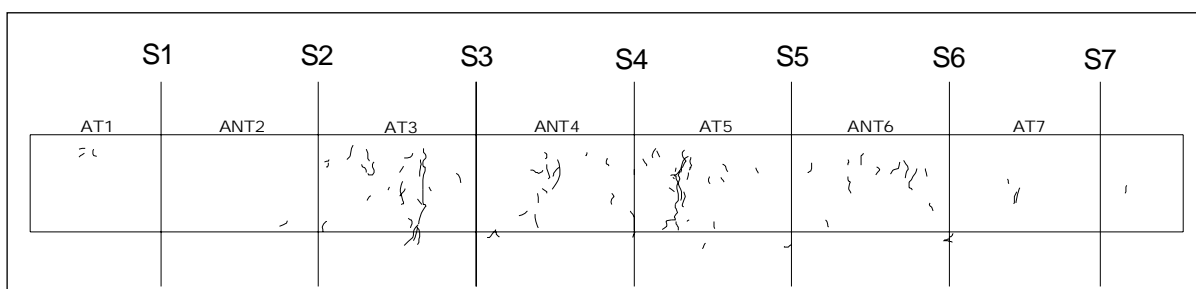


Figura 6.46: Evolução do trincamento N= 379.474

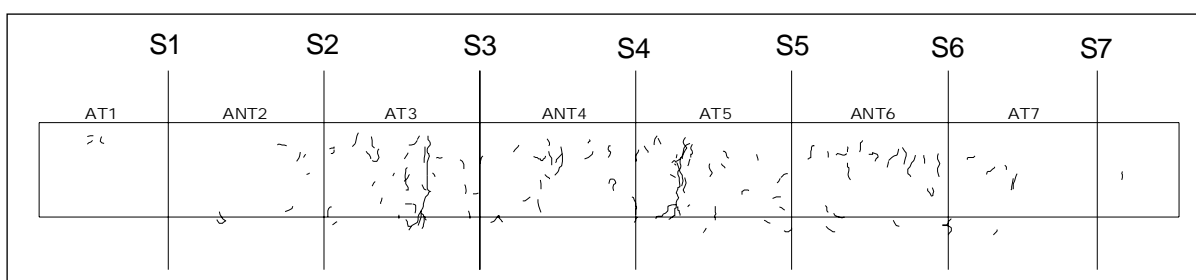


Figura 6.47: Evolução do trincamento N= 462.381- surgimento das últimas trincas

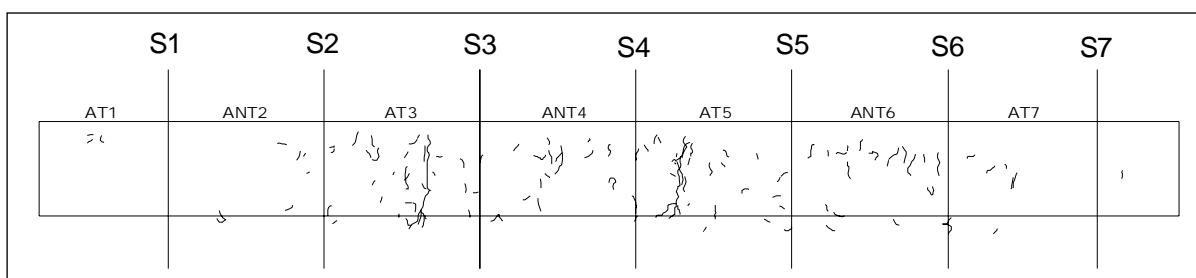


Figura 6.48: Evolução do trincamento N= 513.000- final

A Figura 6.49 apresenta as evoluções dos trincamentos com o número de solicitações nos recapeamentos em asfalto-borracha (AB), e em concreto asfáltico convencional relatados por Azambuja (2004) e Cruz (2005).

Observa-se que:

- A primeira trinca refletida observada na trilha de roda no recapeamento AB foi com N= 123.000 ciclos de carga apresentando densidade de trincamento de  $8,6 \text{ cm/m}^2$ . No recapeamento em AC Azambuja tal aconteceu após 96.500 ciclos de carga apresentando densidade de trincamento de  $11,9 \text{ cm/m}^2$ , e no recapeamento em AC Cruz foi com 14.300 ciclos de carga apresentando densidade de trincamento de  $2,9 \text{ cm/m}^2$ ;

- A densidade de trincamento de 50 cm/m<sup>2</sup> se deu no recapeamento AC Cruz após aproximadamente 53.000 ciclos de carga, no recapeamento AC Azambuja após aproximadamente 134.000 ciclos de carga, enquanto no recapeamento AB esse nível de degradação foi registrado após aproximadamente 294.000 ciclos de carga;
- A densidade de 100 cm/m<sup>2</sup> corresponde no recapeamento em AC a aproximadamente 66.000 ciclos de carga, enquanto no recapeamento em AB corresponde a 339.000 ciclos;
- A densidade de 150 cm/m<sup>2</sup> corresponde no recapeamento em AC após aproximadamente 76.000 ciclos, no recapeamento em AB deu-se após aproximadamente 453.000 ciclos de carga;
- Finalmente, a densidade de trincamento no recapeamento AC Cruz foi de 218,6 cm/m<sup>2</sup> em 90.000 ciclos de carga, no recapeamento AC Azambuja foi de 69 cm/m<sup>2</sup> após 140.000 ciclos de carga e no recapeamento AB foi de 153,6 cm/m<sup>2</sup> em após 462.000 ciclos de carga.

Núñez *et al.* (2005a) concluíram a partir de dados diretos (sem correções) que para um mesmo pavimento original, com o mesmo nível de trincamento imposto (trincas serradas), a evolução do trincamento imposto no recapeamento em asfalto-borracha foi em média 5,55 vezes mais lenta do que no recapeamento em concreto asfáltico convencional ensaiado por Cruz (2005).

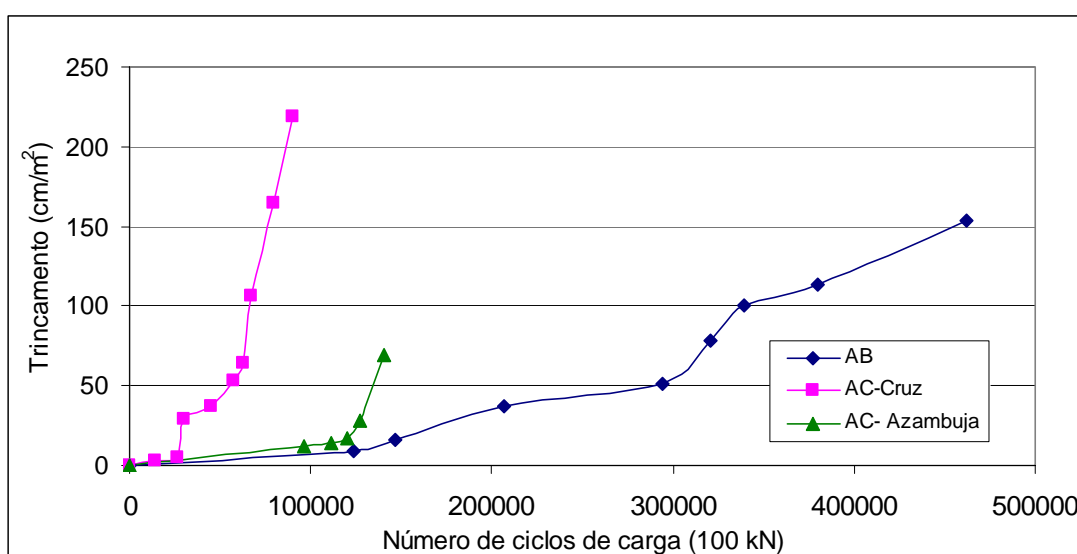


Figura 6.49: Comparativo da evolução do trincamento nos recapeamentos AB, AC Azambuja e AC Cruz.

Entretanto, como previamente mencionado na Tabela 3.1, os resultados apresentados na Figura 6.49, tiveram que ser corrigidos, considerando temperaturas diárias médias durante o tráfego nas 2 estruturas. Enquanto o recapeamento em asfalto-convencional foi ensaiado somente no inverno de 2003, o recapeamento em asfalto-borracha foi trafegado durante 2 primaveras, 2 verões e 1 inverno.

Esta discrepância está exibida na Figura 6.50, onde pode ser visto que os valores médios para as temperaturas diárias médias do ar no recapeamento em asfalto-borracha foi 19,1 °C, significativamente maior que os 13,6 °C, que o valor correspondente ao recapeamento em asfalto-convencional. A Figura 6.51 também apresenta uma distribuição de frequências significativas para 2 faixas de temperaturas.

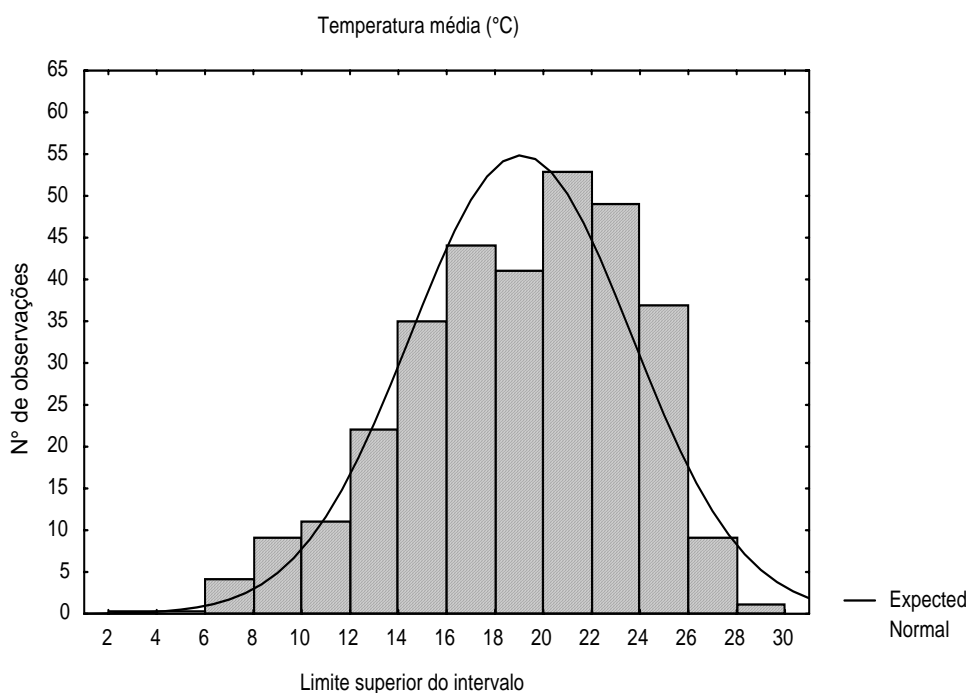


Figura 6.50: Temperaturas médias

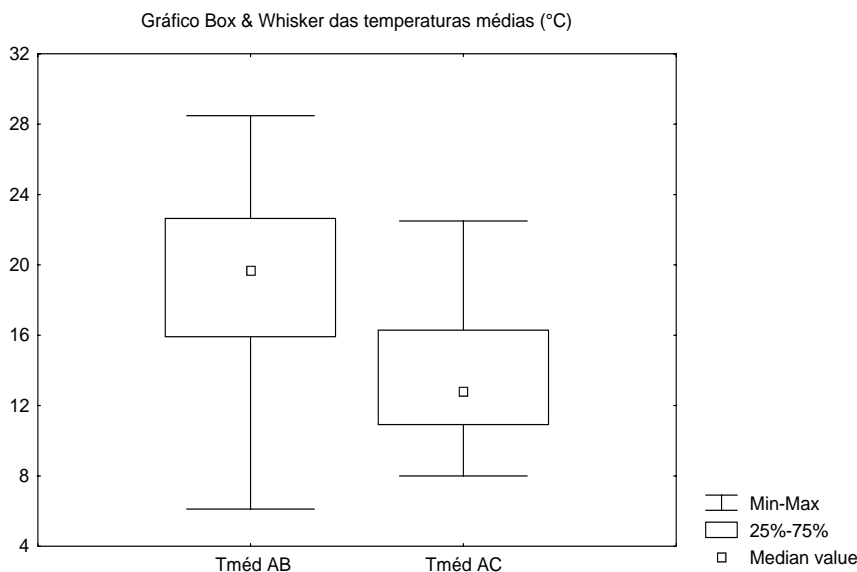


Figura 6.51: Distribuição de freqüências para faixas de temperaturas

Como já foi observado, o trincamento não apareceu somente nas áreas do recapeamento onde a camada subjacente tinha sido trincada artificialmente (AT1, AT3, AT5 e AT7) mas também nas áreas não trincadas. Concluiu-se que subjacentes trincamentos por fadiga tinham ocorrido na fibra inferior da camada de concreto asfáltico subjacente, posteriormente refletindo no recapeamento. Baseado nesta observação, Núñez *et al* (2005b) adotaram o processo seguinte para correção de dados apresentados na Figura 6.49:

- 1) Amostras de recapeamento e concreto asfáltico foram coletados para ensaios de módulos de resiliência de 7 °C a 44 °C;
- 2) Modelos de módulos de misturas asfálticas em função de temperatura foram estabelecidas;
- 3) As temperaturas do ar foram organizadas em distribuições de freqüências;
- 4) Temperaturas do pavimento no plano médio dos recapeamentos em temperaturas a 3 cm ( $T_3$ ) e da camada asfáltica subjacente em temperaturas a 7 cm ( $T_7$ ) foram calculadas usando os resultados de estudos prévios (Núñez *et al*, 2003)

$$T_3 = T_{ar} + 4 \text{ °C} \quad (6.3)$$

$$T_7 = T_{ar} + 2 \text{ °C} \quad (6.4)$$

- 5) Análises mecánísticas foram levadas em consideração para estimar a deformação de extensão ( $\epsilon$ ) na fibra inferior da camada de concreto asfáltico subjacente considerando combinações de módulos nas camadas asfálticas correspondentes às temperaturas do item 4;
- 6) Considerando deformações de extensão estimados no item 5, para cada conjunto de módulos de camadas asfálticas, os números de ciclos de carga para fadiga em ensaios de laboratório ( $N_L$ ) foram estimado modelo 1 (Pinto e Preusseler, 2001):

$$N_L = 1.21 \times 10^{-8} \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^{2.66} \quad (6.5)$$

- 7) Para cada tipo de recapeamento um valor de  $N_L^*$ , foi calculado

$$N_L^* = \frac{\sum(N_{L_i} \times fr_i)}{100} \quad (6.6)$$

Onde:

$N_{L_i}$  é a vida de fadiga estimada pelo modelo (6.5) para cada conjunto de módulos de camada asfáltica correspondente às temperaturas calculadas no item 4, e  $fr_i$  é a frequência (%) correspondente a um dado intervalo de temperaturas dadas, durante o período de tráfego no recapeamento- convencional.

As Tabelas 6.5 a 6.9 mostram os resultados das análises encontradas durante o procedimento.

Tabela 6.5: Entrada de dados para análise mecánística

Camadas	Espessura (mm)	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência (MPa)
Recapamentos AB e AC	50	0,25	Variável
Camada AC subjacente	40	0,25	Variável
Base granular	300	0,35	70 (análise anterior)
Subleito argiloso	$\infty$	0,45	230 (análise anterior)

Tabela 6.6: Módulo das camadas asfálticas durante o tráfego no recapeamento em AC

Intervalos de temperatura do ar (°C)	T <sub>ar</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	MR recapeamento AC (MPa)	T <sub>7</sub> (°C)	MR camada subjacente (MPa)
8 -10	9	13	11.491	11	5.839
10 - 12	11	15	10.008	13	5.253
12- 14	13	17	8.717	15	4.799
14 - 16	15	19	7.593	17	4.435
16 -18	17	21	6.612	19	4.132
18 - 20	19	23	5.760	21	3.879
20 - 22	21	25	5.019	23	3.634
22 - 24	23	27	4.368	25	3.500

Tabela 6.7: Deformações de extensão na base da camada subjacente e vida de fadiga

Intervalo de temperatura do ar (°C)	$\epsilon$ na base da camada subjacente ( $\mu$ strain)	N <sub>Li</sub>	fr <sub>i</sub> (%)	N <sub>Li</sub> x fr <sub>i</sub>
8 -10	276	35,48	16,39	581,52
10 - 12	298	29,48	27,87	821,61
12- 14	319	24,14	13,11	316,48
14 - 16	339	20,53	16,39	336,49
16 -18	358	17,76	13,11	232,83
18 - 20	376	15,59	8,20	127,84
20 - 22	395	13,67	1,64	22,42
22 - 24	409	12,36	3,28	46,97
				$\Sigma = 2.486,16$

Assim, N<sub>L</sub>\* de 24,86 foi calculado para a camada subjacente com recapeamento de AC.

Tabela 6.8: Módulos das camadas asfálticas correspondentes e temperaturas medidas durante o tráfego no recapeamento AC

Intervalos de temperatura do ar (°C)	T <sub>ar</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	MR recapeamento AB (MPa)	T <sub>7</sub> (°C)	MR camada subjacente (MPa)
8 -10	9	13	8.734	11	5.839
10 – 12	11	15	7.054	13	5.253
12- 14	13	17	5.850	15	4.799
14 – 16	15	19	4.954	17	4.435
16 -18	17	21	4.266	19	4.132
18 – 20	19	23	3.723	21	3.879
20 – 22	21	25	3.500	23	3.634
22 – 24	23	27	3.119	25	3.500

Tabela 6.9: Deformações de extensão na base da camada subjacente e vida de fadiga

Intervalo de temperatura do ar (°C)	$\epsilon$ na base da camada defeituosa ( $\mu$ strain)	N <sub>Li</sub>	fr <sub>i</sub> (%)	N <sub>Li</sub> x fr <sub>i</sub>
8 -10	288	31,68	16,39	519,24
10 – 12	313	25,39	27,87	707,62
12- 14	336	21,02	13,11	275,57
14 - 16	357	17,89	16,39	293,22
16 -18	377	15,48	13,11	202,94
18 - 20	395	13,67	8,20	112,09
20 - 22	411	12,30	1,64	20,67
22 - 24	424	11,32	3,28	37,13
				$\Sigma = 2.167,78$

Deste modo, N<sub>L</sub>\* de 21,68 foi calculado para recapeamento em AB.



O coeficiente entre os valores de  $N_L$  para o recapeamento AB e para o recapeamento AC é 0,8721. Este coeficiente deve ser usado para corrigir dados na Figura 6.48. Núñez *et al* (2005b) conclui que 2 recapeamentos tivessem sido ensaiados sob temperaturas do ar idênticas, a eficiência do recapeamento AB retardando as reflexões de trincas seria  $0,8721 \times 5,55 = 4,84$  vezes maior do que aquela que os recapeamentos em AC.

Apesar do reconhecimento de que algumas hipóteses (por exemplo: a variação do módulo de resiliência somente com a temperatura, excluindo o efeito de tráfego) podem ser questionadas, parece que o procedimento adotado nesta análise é consistente e o fator 4,84 é confiável.

Sintetizando: o recapeamento em asfalto-borracha retardou em quase 5 vezes o surgimento de trincas mostrando a eficiência do material como camada retardadora de reflexão de trincas.

Os resultados discutidos neste capítulo, obtidos através de ensaios analisados de pavimentos, validaram os resultados dos estudos em laboratório apresentados em estudos realizados no exterior (Viljoen *et al*, 1987; Harvey *et al*, 2000). Além disso, a pesquisa aqui apresentada permite, pela primeira vez no Brasil, quantificar a eficiência do recapeamento em asfalto-borracha comparado ao concreto asfáltico convencional.

## 6.6 PARÂMETROS DE TEXTURA SUPERFICIAL

### 6.6.1 Microtextura

No decorrer da solicitação de um pavimento, sua superfície torna-se polida conseqüentemente perdendo sua resistência à derrapagem em baixa velocidade.

A Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv- 1999) classifica os revestimentos quanto à resistência à derrapagem (textura do pavimento) impondo valores limites, como mostra a Quadro 6.2.

Quadro 6.2: Classificação do revestimento quanto à resistência à derrapagem

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA	
Classes de resistência à derrapagem - Método do Pêndulo Britânico	
Classes	Valor da resistência à derrapagem (VRD)
Perigosa	<25
Muito lisa	25- 31
Lisa	32- 29
Insuficientemente rugosa	40- 46
Medianamente rugosa	47- 54
Rugosa	55-75
Muito rugosa	>75

Segundo a ABPv, os valores de resistência à derrapagem superiores a 55 são considerados seguros para o tráfego.

A Figura 6.52 apresenta os resultados obtidos através do pêndulo Britânico, equipamento usado para medir indiretamente a microtextura da superfície durante a solicitação do Simulador de Tráfego.

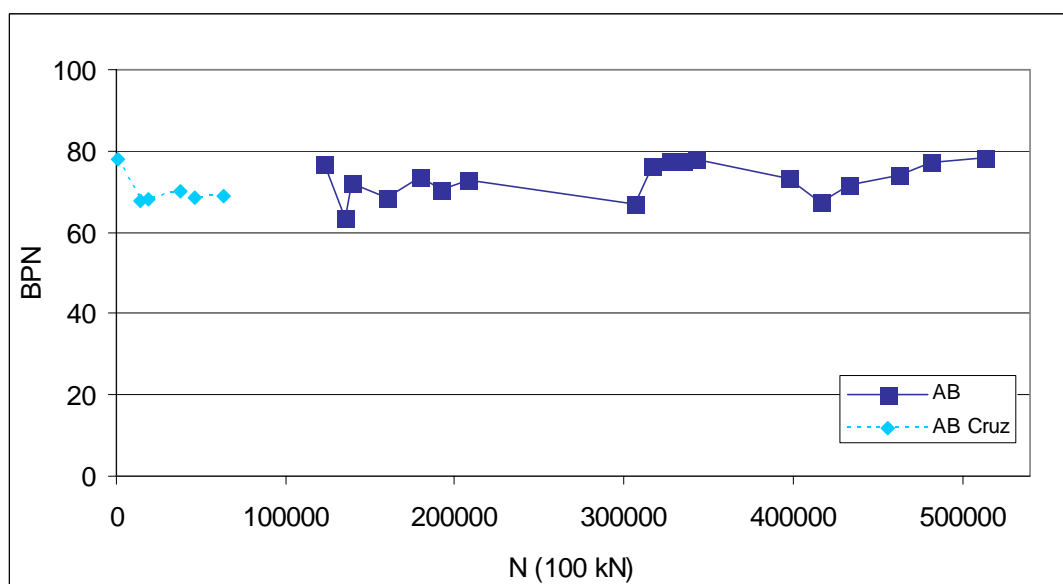


Figura 6.52: Leituras com o Pêndulo Britânico

A Figura 6.52, mostra que os ensaios realizados apresentaram resultados entre 60 e 80. Pela avaliação das condições de segurança pela Tabela 6.5 pode-se classificar a resistência à derrapagem desta pista como muito rugosa. A pista estudada não perdeu resistência á derrapagem com a solicitação do simulador de tráfego.

A Figura 6.53 apresenta um comparativo dos recapeamentos desta pesquisa (AB), estudo de Azambuja (2004) (AC Azambuja) e o estudo de Cruz (2005) (AC Cruz 2005) das leituras do Pêndulo Britânico.

Comparando-se os recapeamentos das leituras com o Pêndulo Britânico tem-se que:

- No início de todos os ensaios as leituras do Pêndulo Britânico apresentaram valor semelhantes, em torno de 80;
- No estudo de Azambuja (2004) o pavimento teve uma perda de resistência à derrapagem, uma leitura final de 63. No estudo de Cruz (2005) também ocorreu uma perda de resistência à derrapagem e a leitura final foi de 64;
- No revestimento analisado nesta dissertação não se registou uma queda significativamente da resistência à derrapagem.

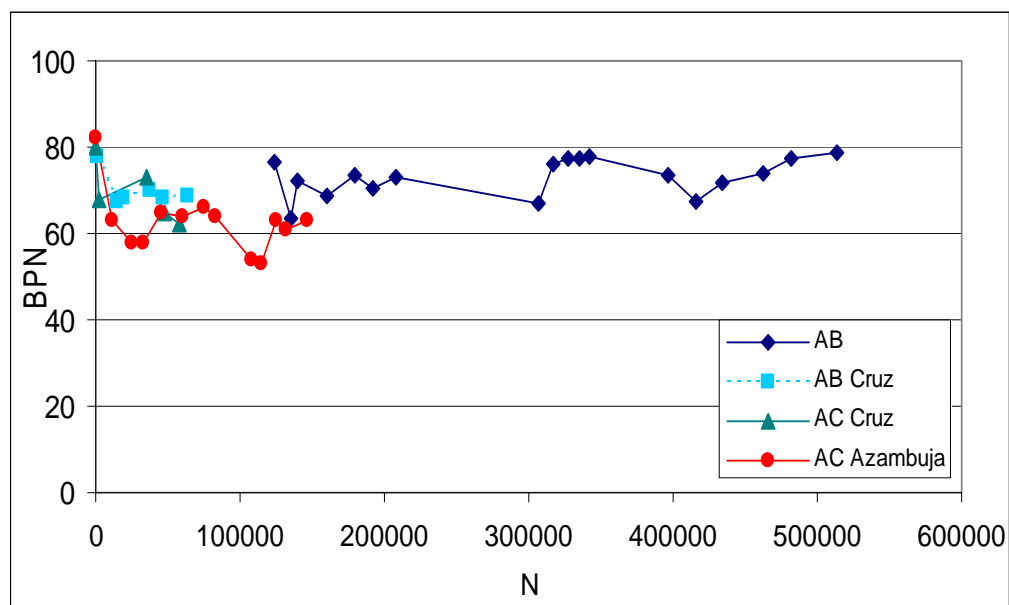


Figura 6.53: Comparativo dos recapeamentos das leituras com Pêndulo Britânico

## 6.6.2 Macrotextura

Através do ensaio da mancha de areia pode-se determinar a macrotextura superficial do pavimento; conseqüentemente este parâmetro influi diretamente na aderência do pneu-pavimento.

No Quadro 6.3 fornecido pela norma ASTM E 965- 96, pode-se avaliar e classificar a macrotextura da superfície.

Quadro 6.3: Classificação da textura em função da altura da mancha

Textura	Faixas de altura da mancha (mm)	
Muito grossa	4,97	1,20
Grossa	1,18	0,80
Média	0,79	0,40
Fina	0,39	0,22
Muito fina	0,22	0,15

A Tabela 6.10 mostra os resultados obtidos no ensaio da Mancha de Areia obtidos no decorrer da pesquisa.

Conforme Tabela 6.10 observou-se que a media da altura da mancha de areia foi de 1,83 mm, esse valor pelo Quadro 6.3 pode-se classificar a textura da superfície do pavimento como muito grossa.

Tabela 6.10: Resultados do ensaio da “Mancha de Areia”

Número de ciclos de carga de eixo (100 kN)	Altura da Mancha (mm)
135304	1,66
306715	1,88
317084	1,72
327361	1,75
335009	1,72
342.372	1,81
376.160	1,98
396.867	2,02
415.663	2,05
433.601	2,04
462.477	2,02
481.477	2,04
513.452	2,01
Média	1,83
Desvio padrão	0,13

Assim, conclui-se que também do ponto de vista da segurança (resistência à derrapagem) o recapeamento em concreto asfáltico com ligante modificado com borracha, teve um desempenho plenamente satisfatório.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 7.1 CONCLUSÕES DESTA PESQUISA

A partir dos resultados analisados no capítulo 6 podem-se inferir as seguintes conclusões referentes ao comportamento do recapeamento em asfalto-borracha solicitado pelo simulador de tráfego:

- O emprego de asfalto-borracha na mistura asfáltica representou um aumento significativo de vida útil do recapeamento. Verificou-se que a evolução do trincamento no recapeamento em asfalto-borracha foi retardada em 5 vezes, em comparação com a evolução registrada em recapeamento convencional (com ligante CAP-20 sem modificação) previamente estudado;
- O nível de severidade do trincamento igual a 100 cm/m<sup>2</sup> ocorreu no recapeamento em asfalto-borracha, após 340.000 solicitações de carga de eixo de 100 kN, enquanto no recapeamento em asfalto convencional tal nível de severidade foi registrado com somente 66.000 solicitações da mesma carga de eixo;
- As medidas de deflexões no recapeamento em asfalto-borracha mantiveram-se praticamente estáveis até 450.000 de ciclos de carga. Posteriormente sofreram uma redução, provavelmente devido ao efeito das temperaturas elevadas que ocasionam redução do teor de umidade na base e no subleito, com decorrente aumento na sucção (principalmente no subleito) e do módulo de resiliência. Também em termos estruturais o desempenho do recapeamento em asfalto-borracha foi bem superior ao do recapeamento convencional antes solicitado. Neste último, as deflexões experimentaram reduções iniciais, seguidas de um aumento progressivo e significativo após 80.000 ciclos de carga, sugerindo fadiga;
- No recapeamento em asfalto-borracha a tensão horizontal medida foi aumentando gradativamente até 129.000 ciclos de carga. Posteriormente, a tensão apresentou

brusca queda, podendo ser indício de dano no sensor. As deformações horizontais na direção longitudinal e a 45° mostraram aumento progressivo;

- Os afundamentos de trilha de rodas nos recapeamentos em asfalto-borracha e no convencional antes estudado apresentaram evoluções iniciais semelhantes, mas a partir de 37.000 ciclos de carga a taxa de deformação plástica no recapeamento em asfalto-convencional tornou-se maior. Em decorrência, o afundamento de trilha de roda final (7 mm), registrado 98.000 ciclos de carga de eixo de 100 kN na estrutura com recapeamento em asfalto-convencional, foi alcançado somente após 258.000 solicitações de mesma magnitude na estrutura com recapeamento em asfalto-borracha;
- Verificou-se por meio de análise mecanística e aplicação de modelo de fadiga que é possível comparar desempenhos de pavimentos em estruturas semelhantes, ensaiadas em épocas diferentes (com diferentes distribuições de frequência para as temperaturas médias);
- Quanto à textura superficial do pavimento, nenhum dos recapeamentos estudados apresentaram níveis considerados inseguros ao tráfego.

No global, observa-se que o recapeamento em asfalto-borracha conferiu ao pavimento melhores condições funcionais e estruturais, se comparado com um recapeamento convencional da mesma espessura, executados sobre pavimentos com níveis de degradação similares. Também foi possível quantificar o aumento da vida útil que a modificação do ligante com borracha conferiu ao recapeamento. Isto permitirá uma análise posterior benefício/ custo.

## 7.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

- Comparar o desempenho do recapeamento analisado nesta dissertação, com resultados de pesquisas de campo (execução e monitoramento de trechos experimentais) envolvendo o mesmo material;
- Realizar uma análise benefício/ custo do emprego de asfalto-borracha em recapeamentos em concreto asfálticos sobre revestimentos trincados e/ ou com deficiência estrutural;
- Realizar um estudo semelhante ao analisado nesta dissertação, variando-se as espessuras dos recapeamentos (mais delgados, como por exemplo, 3 cm) e/ ou o nível de severidade do trincamento imposto a camada inferior.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBANO, J. F. **Efeitos da variação da carga por eixo e por tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento.** Porto Alegre, 1998. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO: Guide for Design of Pavement Structures.**, Washington, D. C., 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for asphalt-rubber binder.** D 6114-97. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, p.659-661, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester.** D303-93. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique.** D965-96. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 3p. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. ABPv: **Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem Através de Aparelhagem Portátil. Boletim Técnico nº 18.** Rio de Janeiro, 1999.

AZAMBUJA, D. M. **Estudo de recapeamentos asfálticos de pavimentos dos ensaios acelerados.** Porto Alegre, 2004. 122p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AZAMBUJA, D. M.; CERATTI, J. A. P. **Estudo do recapeamento asfáltico utilizando a técnica de ensaios acelerados.** In: – XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** v. 1. 2004. p. 5 – 14.

AZAMBUJA, D. M.; THEISEN, K.; BRITO, L.; CRUZ, L.; CERATTI, J. A.; NÚÑEZ, W. P. **Comparação entre as respostas estruturais de pavimentos medidas *in situ* e estimativas pela teoria da elasticidade.** In: XXXI JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 17 a 21 de Maio de 2004. Cd room

BERTOLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus.** São Carlos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 197p.

BROWN, D. R.; JARED, D.; JONES C., WATSON, D. **Georgia's experience with crumb rubber in hot mix asphalt.** Transportation Research Record, Washington, n.1583, p.45-51. 1997.

BROWN, S. F.; BRODRICK, B. V. **“25 Years Experience with the pilot-scale Nottingham Pavement Test Facility”.** Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Cd-room. 1999.

CALTRANS. **Asphalt Rubber Usage Guide.** Sacramento: State of California Department of Transportation, 2003. 45p.

CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P.; FABRÍCIO, J. M. **Emprego de deflectógrafo digital (viga Benkelman eletrônica) na monitoração do pavimento da rodovia concessionada BR- 290/RS: Osório- Porto Alegre- Guaíba.** In: ABPv – 32º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16 a 20 de Outubro de 2000, Brasília, **Anais...**, 2000. p. 987 – 995.

CRUZ, L. L. **Estudo comparativo do desempenho de um recapeamento utilizando asfalto-borracha em pavimento flexível.** Porto Alegre, 2005. 119p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DEMPSEY, B. J. **Development and Performance of Interlayer Stress Absorbing Composite (ISAC) in AC Overlay.** 81<sup>nd</sup> Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER: **Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros,** Rio de Janeiro.T. I e II, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ES-128/83. **Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-testemunha de Rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígido para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede.** . 1983.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-TER-01/78. **Terminologia, Defeito nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos.** 1978.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER- ME 024/94. Pavimento – **Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman.** 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER- IPR. Pavimento- **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos** . 1998.

ELSEIF, M. M.; AL-QADI, I. L., **A Simplified Overlay design model Against reflective Cracking Utilizing Service Life Prediction.** 82<sup>nd</sup> Annual meeting, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2003. Cd-rom.

EPPS, A. L.; HARVEY, J. T.; KIM, R. Y.; ROQUE, R. **Structural requirement of bituminous paving mixture.** Transportation in the new millennium- state of the art and future direction. Transportation Research Board, Washington, 2000. 6p.

EPPS, J. A. **Uses of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway research Program.** Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board, Washington, 1994. 161p.

ESTAKHRI, C. K.; BUTTON, J. W. FERNANDO, E. G. **Use, availability, and cost effectiveness of asphalt rubber in Texas.** Transportation Research Record. Washington, n.1339, p.30-37. 1992.

GONÇALVES, F. P. **Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir da instrumentação e ensaios acelerados.** Porto Alegre, 2002. 467p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A. P.; RODRIGUES, R. M.; NETO, L. S. **Estudo experimental do desenvolvimento de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico: Construção e instrumentação de seções- teste.** In: ABPv – 32º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16 a 20 de Outubro de 2000, Brasília, **Anais...**, 2000. p. 950 – 957.

HARVEY, J. T.; TAYBALI, A. A.; DEACON, J. A.; LEAHY, R. B; MONISMITH, C. L. Caltrans Accelerated Pavement test (CAL/ APT): Program Summary Report: Six- Year Period: 1994- 2000, Report FHWA/CA/RM- 200/15, Prepared for the California Department of Transportation, Paviment Research Center, CAL/APT Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, June 2000, 112p.

HICKS, R. G.; EPPS, J. A. **Life Cycle Analysis of asphalt-rubber paving materials.** Final Report Pavements Association. 1999.

HORAK, E.; KLEYN, E. G.; JOSEPH A. DU PLESSIS; ETTIENNE, M. DE VILLIERS; ALLAN, J. T. **The impact and management of the heavy vehicle simulator (HVS) fleet in South Africa.** 7 International Conference on Asphalt Pavement. 1999

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

KIM, K. W.; LEE, S. J.; DOH, Y. S.; RHEE, S. H.; PARK, T. S. **Estimation of Relative Performance of Overlaid Asphalt Concretes against Reflection Cracking due to Shear and Bending Fracture Mode.** In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Lisbon, Portugal, v.1, p.539- 547, 2002

LEITE, L. M.; SILVA, P. A.; EDEL, G.; MOTTA, L. G.; NASCIMENTO, L. A. H. Asphalt Rubber in Brazil: **Performance and Laboratory Study.** In: Proceeding of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília, Brazil, December 2003, p. 229- 245.

MARONI, L.G.; MONTEZ, F.T. **O Geotextil não Tecido como Elemento retardador da Propagação de Trincas em Recapeamentos Asfálticos:** Evolução Tecnológica Sul-Americana. 29<sup>o</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, v. 1, 1995, p.194- 214

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997, 380p.

METCALF, J. B. **Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing.** In: National Cooperative Highway Research Program, NCHRP: Synthesis of Highway Practice, n<sup>o</sup> 235. Washington D.C., 1996. 110p.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico**, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 258p.

MONISNITH, C. L.; DEACON, J. A. **Fadigue of Asphalt Paving Mixture**, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1969.

NOKES, W. A.; STOLARSKI, P. J.; MONISMITH, C. L.; HARVEY, J. T. **Establishing the California Department of Transportation Accelerated Pavement Testing Program-TRR/1540**, p. 91-96. 1996

NÚÑEZ, W. P. **Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997. 297p.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; WICKBOLDT, V.; BRITO, L. A. T.; OLIVEIRA, J. A. **Delaying cracks reflection in overlays: na APT study comparing the efficiency of conventional asphalt concrete and asphalt-rubber**. In Proceedings of the 4<sup>th</sup> Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements, Belfast, Northern Ireland, 2005. Cd room.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A.; OLIVEIRA, J. A. **Elastic Analysis of Thin Pavements and Subgrade Soil Based on Field and Laboratory Tests**. In: 6<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Airfields, Lisbon, Portugal, v.1, p.685- 696, 2002.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; WICKBOLDT, V.; BRITO, L. A. T.; VIVIAN, J. **Models for estimating pavement temperatures: a contribution to the study of rutting in bus lanes in Porto Alegre**. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> Urban Pavements Meeting. Aracaju, Brazil, 2003.v. 1. p. 1- 18.

ODA, S.; **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentos**. São Carlos, 2000. tese (Doutorado em Engenharia)- escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos. 251p.

PINTO, S. PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária- Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 2<sup>o</sup> ed. 2002, 269p.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. Tese (Doutorado em Engenharia)- COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 208p

SEVERO, L.; RUWER, P.; GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A. P.; MORILHA, A. **Performance of Asphalt- Rubber Hot Mix Overlays at Brazilian Highway**. In Proceeding of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília, Brazil, December 2003, p. 663- 642.

SIDDHARTHAN, R.V.; KRISHNAMENON, N.; EL-MOUSLY, M.; SEBAALY, P. E. **Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response**. In: Journal of Transportation Engineering, Volume 128, p.136-144, March/April 2002.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Porto Alegre, 2004. 278p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; PALUDO, H. **Laboratory Evaluation of Tire Use as Hot Mix Aggregate**. In Proceedings of the Asphalt-Rubber 2003 Conference, Brasília, Brazil, December 2003, p. 603- 614.

TIGHE, S.; HASS, R.; PONNIAH, J. **Life Cycle Cost Analysis of Mitigating Pavement Rehabilitation Reflection Cracking**. 82<sup>nd</sup> Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. CD-ROM

VIERA, C. S. **Desempenho de um pavimento flexível solicitado por simulador de tráfego**. Porto Alegre, 2002. 132p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VILJOIN, A.W., FREEME, C.R., SERVAS, V.P., RUST, F.C. **Heavy Vehicle Simulator Aided Evaluation of Overlays on Pavements with Active Cracks**. In: Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, Vol I, 1987, p. 701-709.

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