



**PROJETO DE PESQUISA CONCEPA - LAPAV**

***"Análise da eficiência de soluções aplicadas  
em projetos de recuperação estrutural de  
pavimentos rodoviários"***

**ANÁLISE DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO  
DA RODOVIA BR-290/RS ATRAVÉS DE  
ENSAIOS ACELERADOS**

**RELATÓRIO FINAL**

dezembro de 2007

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1 ENSAIOS ACELERADOS.....	7
2.1.1 Simuladores de tráfego.....	7
2.1.1.1 Simuladores de tráfego de pequeno porte ou de laboratório .....	8
2.1.1.2 Simuladores de tráfego de médio porte.....	14
2.1.1.3 Simuladores de tráfego de grande porte .....	20
2.1.2 Outros estudos envolvendo ensaios acelerados e o desempenho de pavimentos .....	26
2.2 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS .....	31
2.2.1 Mecanismos de deterioração de pavimentos asfálticos.....	34
2.2.1.1 Fadiga de misturas asfálticas.....	34
2.2.1.2 Reflexão de trincas.....	41
3 A RODOVIA BR-290/RS.....	44
3.1 LOCALIZAÇÃO DA RODOVIA.....	44
3.1.1 Histórico da Rodovia BR-290/RS .....	45
4 METODOLOGIA .....	48
4.1 A ESTRUTURA AVALIADA.....	48
4.1.1 Definição do local do ensaio.....	49
4.2 O SIMULADOR DE TRÁFEGO MÓVEL .....	53
4.2.1 Histórico do Simulador de Tráfego HVS empregado na pesquisa .....	61
4.3 PARÂMETROS DE ANÁLISE .....	63
4.3.1 Parâmetros estruturais.....	63
4.3.1.1 Medidas Deflectométricas .....	63
4.3.2 Parâmetros de comportamento .....	65
4.3.2.1 Marcação de trincas .....	65
4.3.2.2 Deformações Permanentes .....	67

	3
4.3.3 Parâmetros da textura do pavimento .....	68
4.3.3.1 Pêndulo Britânico .....	68
4.3.3.2 Mancha de Areia .....	69
4.3.4 Parâmetros ambientais .....	69
4.3.5 Retiradas de amostras em campo .....	70
4.3.5.1 Amostras do Revestimento Asfáltico .....	70
4.3.5.2 Amostras nos Materiais Granulares .....	71
5 RESULTADOS.....	73
5.1 DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS.....	73
5.2 “TRECHO SIMULADO 1” .....	74
5.2.1 Histórico de Carregamento.....	74
5.2.2 Parâmetros estruturais.....	75
5.2.3 Parâmetros de comportamento .....	78
5.2.3.1 Marcação de trincas .....	78
5.2.3.2 Deformações Permanentes .....	81
5.2.4 Parâmetros da textura do pavimento .....	82
5.2.5 Parâmetros ambientais .....	83
5.2.5.1 Temperatura do ambiente.....	83
5.2.5.2 Precipitação pluviométrica.....	83
5.2.6 Retiradas de amostras em campo .....	84
5.3 “TRECHO SIMULADO 2” .....	85
5.3.1 Histórico de Carregamento.....	85
5.2.2 Parâmetros estruturais.....	86
5.2.3 Parâmetros de comportamento .....	88
5.2.3.1 Marcação de trincas .....	88
5.2.3.2 Deformações Permanentes .....	92
5.3.4 Parâmetros da textura do pavimento .....	93
5.3.5 Parâmetros ambientais .....	93

	4
5.3.5.1 Temperatura do ambiente.....	93
5.2.5.2 Precipitação pluviométrica.....	94
5.3.6 Retiradas de amostras em campo .....	94
5.4 COMPARAÇÃO DOS DOIS TRECHOS ENSAIADOS.....	95
5.4.1 Parâmetros estruturais.....	95
5.4.2 Parâmetros de comportamento .....	96
5.4.2.1 Marcação de trincas .....	96
5.4.2.2 Deformações Permanentes .....	97
5.4.3 Resumo dos resultados.....	98
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
6.1 "TRECHO SIMULADO 1" .....	99
6.2 "TRECHO SIMULADO 2" .....	100
6.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS.....	103
ANEXOS .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

Os meios de transporte são elementos de extrema importância para a promoção do desenvolvimento sócio-econômico de uma determinada região. Através da mobilidade de mercadorias (sejam produtos de importação ou de exportação) e da acessibilidade a todas as partes de um território, permitindo qualquer tipo e finalidade de deslocamentos, os meios de transporte tornam-se fundamentais à sociedade.

Esse transporte pode ocorrer por diferentes modais, como o ferroviário, aeroviário e aquaviário, mas o transporte pelo meio rodoviário é o mais utilizado em regiões subdesenvolvidas, como o Brasil, tanto para os deslocamentos de cargas como para os de passageiros. No Brasil, particularmente, em relação ao transporte de carga, por exemplo, mais de 60% da carga transportada é pelo modal rodoviário. Já o transporte de passageiros quase que a totalidade ocorre por esse meio.

Há inúmeras razões para o predomínio do transporte rodoviário no Brasil, mas a principal encontra-se na política de governo adotada em meados do século passado, no chamado "milagre econômico", período que ficou caracterizado pela administração do presidente Médici e que houve grandes investimentos na implementação da indústria, entre elas a automobilística, e na infra-estrutura rodoviária, deixando marginalizados os outros modais.

Um sistema de transportes é constituído basicamente de dois elementos: veículo transportador e infra-estrutura. Sobre o veículo de transporte rodoviário vem ocorrendo no Brasil uma grande evolução tecnológica nas últimas décadas; já sobre a infra-estrutura rodoviária pouca atenção foi dada nas últimas décadas, com grande parte das rodovias pavimentadas existentes tendo sido construídas em uma época em que pouca atenção e estudos eram dados à qualidade dos constituintes do pavimento, bem como à estrutura projetada. Assim, as rodovias, hoje, se encontram, quando pavimentadas, em péssimas condições de conservação, com mais de 50%

dos pavimentos estando em estado ruim ou péssimo. Essas condições se dão essencialmente ao tráfego de veículos comerciais pesados, diversas vezes com excesso de carga devido à falta de fiscalização, e às desfavoráveis condições climáticas.

Neste contexto, os administradores rodoviários, governo ou concessionárias, têm que realizar investimentos cada vez maiores, quer na construção de pavimentos novos, quer na recuperação de trechos que necessitem de uma intervenção, com o intuito de encontrar soluções que contemplem pavimentos mais resistentes, mais duráveis e que demandem pequenas manutenções ao longo do período para que foram projetados, assegurando, nesse período, conforto e segurança aos usuários.

Esta pesquisa tem como principal objetivo avaliar, realizando ensaios acelerados, o desempenho de uma estrutura de pavimento real da rodovia BR-290/RS submetida à aplicação das cargas do tráfego impostas em verdadeira grandeza pelo trem de cargas de um simulador linear de tráfego. Nessa avaliação, serão realizados levantamentos da variação das condições do pavimento e, a partir desses, estimar a vida residual dos segmentos de pavimentos analisados, verificando a eficiência de cada estrutura, com o acompanhamento do comportamento do desempenho do pavimento quando submetido ao tráfego.

Através dessa avaliação, será possível estimar a vida residual da estrutura adotada, verificando a eficiência da mesma, com o acompanhamento do comportamento do desempenho do pavimento quando submetido ao tráfego.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 ENSAIOS ACELERADOS**

O objetivo principal da realização de ensaios acelerados é reproduzir, em um curto espaço de tempo, a deterioração que irá ocorrer em um pavimento ao longo do seu período de projeto. Para permitir a aceleração da degradação do pavimento durante a realização deste tipo de ensaio, de modo geral, são utilizados níveis de solicitações de cargas superiores àqueles aos quais as estruturas estarão submetidas na realidade, preconizados pela legislação acerca do excesso de carga vigente em cada país.

Os resultados das pesquisas realizadas envolvendo ensaios acelerados em escala real permitiram avanços significativos na prática da engenharia de pavimentos. Atualmente, o uso de ensaios acelerados tem sido cada vez mais difundido como uma ferramenta de apoio ao processo de tomada de decisão, no que se refere à utilização de novos materiais e no estabelecimento de procedimentos que possibilitem a análise da relação benefício-custo de estratégias alternativas tanto para construção de pavimentos novos como em projetos de restauração rodoviária.

#### **2.1.1 Simuladores de tráfego**

Os simuladores de tráfego são equipamentos que tem a finalidade de realizar em curto espaço de tempo a determinação da vida útil do pavimento através de ensaios acelerados, ou seja, permitem testar seções típicas de estruturas de pavimento, em escala real, porém de maneira acelerada. No entanto não reproduzem os fatores climáticos, como temperatura, umidade e insolação.

Os simuladores de tráfego são aplicados em pequenas seções se comparadas às dimensões da estrada, porém em condições de escala real quanto aos materiais, com aplicação acelerada de cargas predefinidas, reduzindo o tempo necessário para o desenvolvimento de variações na serventia.

Muitos estudos já foram realizados com a utilização de simuladores de tráfego através de ensaios acelerados em todo o mundo, principalmente na África, Europa e na América do Norte.

Os simuladores de tráfego são divididos em três grupos:

- ✖ Simuladores de tráfego de pequeno porte ou de laboratório;
- ✖ Simuladores de tráfego de médio porte;
- ✖ Simuladores de tráfego de grande porte.

#### 2.1.1.1 Simuladores de tráfego de pequeno porte ou de laboratório

Os simuladores de tráfego de pequeno porte de laboratório desempenham papel complementar àqueles das pistas experimentais. São ensaios acelerados, capazes de estimar em poucas horas o comportamento de uma mistura de concreto asfáltico ao final de sua vida de projeto.

Estes ensaios acelerados em laboratório para estudo do fenômeno da deformação permanente são de certa forma, bastante aproximados das condições reais de solicitações sofridas pelo revestimento, e os resultados obtidos podem prover um critério de seleção de dosagem de misturas sob este aspecto.

Estes simuladores geralmente são instalados em laboratórios, e apresentam algumas limitações quanto a suas condições de simulação. Alguns exemplos de simuladores de pequeno porte são:

- ✖ Holanda – Shell (Rolling Well Machine): é uma pista circular de 3m de diâmetro, as seções de pavimentos são entre dois muros de concreto, as vigas possuem



rodas nas extremidades, a carga se dá entre 1kN e 20kN e sua velocidade é de 20km/h.

- × Portugal – LNEC: é um equipamento para teste de revestimentos asfálticos em flexão dinâmica, sob ação de cargas rolantes repetidas.
- × França – LCPC: é um equipamento utilizado para estudar afundamento de trilha de roda.
- × APA – Departamento Transportes da Geórgia, criado em 1985: é um equipamento que pode ser usado para avaliar a deformação permanente, trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade.

Existem no Brasil dois modelos de simuladores de laboratório: LCPC e APA, descritos a seguir:

#### *2.1.1.1.1 Simulador de Tráfego da USP - LCPC*

Um simulador de laboratório de pequeno porte conhecido como LPC – Wheel-Tracking Rutting Test, foi desenvolvido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) no período de 1968 a 1970. Este simulador tem a finalidade de estudar o afundamento de trilha de roda na fase de dosagem das misturas asfálticas. A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo possui um LPC.

Conforme MERIGHI (1995), o simulador da USP consiste basicamente de um conjunto composto por dois equipamentos mecânicos, acionados por dispositivos hidráulicos e pneumáticos. Um conjunto de equipamentos é destinado a simular o tráfego através da repetição de carga aplicada por uma roda submetida a esforço vertical e seu movimento longitudinal se dá sobre o corpo de prova.

O equipamento de compactação é formado por um conjunto mecânico, acionado por um motor elétrico, um sistema hidro-pneumático acionado por uma central de ar comprimido de laboratório, comandado através de um painel eletro – eletrônico. Para a confecção dos corpos-de-prova são necessários alguns componentes:

- × Moldes: para a confecção dos corpos-de-prova;
- × Mesa de Compactação: utilizada para fixação e apoio do molde;
- × Eixo para Fixação da Roda: acionado hidráulicamente, o eixo permite o deslocamento da roda e três posições distintas que corresponde ao centro e bordas do corpo de prova;
- × Sistema de Controle: consiste basicamente em um painel de controle.
- × Seletor de posição de bloqueio do eixo da roda;
- × Botão de emergência;
- × Horímetro;
- × Totalizador de ciclos do eixo de compactação;
- × Manômetros;
- × Válvulas de controle de pressão.

As amostras de misturas asfálticas podem ser obtidas em campo ou no laboratório.

O simulador de tráfego do Laboratório de Tecnologia de Pavimentos da Escola Politécnica da USP, Figura 2.1. tem as seguintes características:

- × A simulação é feita sempre com dois corpos-de-prova por vez;
- × Ciclos de 1 hz;
- × Aceleração máxima de  $10\text{m/s}^2$ ;
- × Pneu 400 x 8, inflado com pressão de 0,6MPa;
- × Carga no eixo de 5,0kN;
- × Amplitude da roda de 205mm;

- × Movimentos da roda ao longo do eixo da placa são aplicados no centro da placa por aproximadamente 0,1s;
- × Inclinação no eixo da roda de 0° a 10°;
- × Curso vertical da mesa de apoio do corpo de prova de 150mm;
- × Aquecedor até 70°C;
- × Painel de controle.



Figura 2.1 – Simulador de tráfego tipo LPC da USP/SP

Para a execução do ensaio são necessários sempre dois corpos-de-prova, cujos moldes são fixados no simulador. O nível de temperatura do ensaio pode ser ajustado conforme desejado, porém em geral se utiliza 60°C. A roda começa a passar sobre a amostra com ciclo de 1Hz. De acordo com a norma francesa de 1991, as leituras do valor do afundamento de trilha de roda devem ser realizadas quando o eixo da roda atingir: 30; 100; 1000; 3000; 10.000; 30.000 e 100.000 ciclos, e o ensaio deve ser interrompido se o afundamento for maior que 15mm.

A utilização deste tipo de simulador de tráfego é muito importante, pois auxilia tanto no projeto e na dosagem de misturas asfálticas como na compreensão do desempenho dos revestimentos asfálticos.

A avaliação da medida dos afundamentos de trilha de roda em misturas de concreto asfáltico submetidas a simulador de tráfego LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) fundamenta-se nas especificações francesas.

O critério utilizado é o que especifica porcentagem máxima de afundamento em trilha de roda de 10% em relação à espessura da amostra ensaiada para 30.000 ciclos, para misturas de concreto asfáltico adequadas a camada de revestimento.

COELHO (1996) realizou um estudo com o simulador de tráfego LCPC da USP, com objetivo de analisar os afundamentos de trilha de roda em três misturas de Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ. Nos três casos utilizou o CAP20 na composição das misturas.

#### *2.1.1.1.2 Analisador de Pavimento Asfáltico – APA*

O APA surgiu em 1985, no Departamento de Transporte da Geórgia, com o objetivo de desenvolver um método simplificado de ensaios para a previsão de características de deformação plástica de misturas asfálticas.

O APA – Analisador de Pavimento Asfáltico, é um simulador de pequeno porte que se encontrava instalado no laboratório de Misturas Asfálticas do CENPES/PETROBRÁS, até 2004, e hoje está no laboratório da BR Distribuidora em São José dos Campos. Aspectos deste equipamento podem ser vistos na Figura 2.2. Este simulador pode ser usado para avaliar a deformação permanente, o trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas moldadas á quente e a frio.

O tempo de teste para uma avaliação completa de deformação permanente é de 2 horas e 15 minutos para um total de 8.000 ciclos. A suscetibilidade à deformação permanente é estimada colocando amostras retangulares ou cilíndricas sob cargas de

roda metálicas que se apóiam em borrachas padronizadas. São obtidas medidas automáticas da profundidade da trilha de roda sob a passagem da roda.

O APA possui rodas de alumínio côncavas, que se movem ao longo de uma mangueira de borracha de  $\frac{3}{4}$ " (19mm) de diâmetro pressurizada e esticada longitudinalmente sobre a amostra, gerando uma pressão de contato, mostrada na Figura 2.2.

SÁ (2003) descreve o APA como um equipamento com múltiplas funções, que além da avaliação da deformação plástica, tem sido empregado para análise de trincamento por fadiga e suscetibilidade à umidade de amostras tanto retangulares como cilíndricas, moldadas em laboratório. O equipamento permite que os testes de previsão de deformação permanente sejam efetuados simultaneamente sobre três amostras em forma de viga ou seis cilindros, ou uma combinação de ambos.

Os testes de deformação permanente são conduzidos à temperatura controlada de 30 a 70°C. Durante o ensaio pode-se simular uma pressão de pneus superior a 827kPa. A medida da profundidade da trilha de roda é efetuada por um sistema de medição automática. Para determinar a resistência à fadiga a mangueira de borracha usada no teste de deformação permanente é substituída por uma roda de aço.



Figura 2.2 – Simulador de tráfego tipo APA

### 2.1.1.2 Simuladores de tráfego de médio porte

Os simuladores de médio porte na sua maioria também operam a céu aberto. Alguns exemplos de simuladores de médio porte são.

- × Alemanha (1960): o simulador de médio porte da Alemanha apresenta duas vigas metálicas paralelas que suportam uma plataforma móvel que carrega uma roda de 100cm de diâmetro e sua velocidade chega a 50km/h. Sua carga varia de 4kN a 20kN, as seções de pavimento são de 10m úteis e 30m de aceleração e desaceleração.
- × Austrália e USA (1980) – ALF (Accelerated Loading Facility): possui uma estrutura metálica de suporte, sua carga varia de 40kN a 80kN com rodas duplas a uma velocidade de 20km/h em seções testes de 12m. Tem um sistema de aceleração e desaceleração por rampas, carregamento em um sentido e o deslocamento transversal é dado por todo o equipamento.
- × África do Sul (1970): é o mais diferente dos demais, denominado HVS (Heavy Vehicle Simulator), foi montado em uma estrutura sobre rodas, que podem deslocá-lo por meios próprios até o local de testes, realizando o carregamento na pista real. Sua aplicação de carga pode variar de 20kN a 80kN a uma velocidade de 10km/h, carregamento nos dois sentidos com extensão de 6m e largura de 1m.

A configuração atual do HVS está mostrada na Figura 2.3. A partir dos ensaios acelerados in situ realizados, foram derivados modelos de previsão de desempenho para a consideração do trincamento por fadiga da base cimentada em pavimentos semi-rígidos.

A aplicação das cargas do tráfego pelo HVS pode ser feita numa única direção ou de modo bidirecional. A velocidade máxima de deslocamento é de 8 km/h, podendo aplicar até 17.000 repetições de cargas por dia. O comprimento de viagem é de 7,5 m e o deslocamento lateral programável de até 1,5 m. Podem ser aplicadas cargas de até 200 kN. Também se pode medir a sucção a várias profundidades com pressiômetros. Os sensores de deslocamento, instalados no pavimento, permitem

acompanhar a resposta das várias camadas do pavimento ao longo de carregamentos sucessivos, de várias intensidades e distâncias transversais.



Figura 2.3: Heavy Vehicle Simulator

Neste grupo enquadra-se também o segundo simulador instalado no Brasil que é o da UFRGS. O simulador de tráfego da UFRGS DAER/RS foi construído entre 1992 e 1994 pelo DAER/RS. A motivação inicial para sua construção foi conhecer o comportamento estrutural de camadas de basalto alterado quando empregado em rodovias de baixo volume de tráfego. Esta pesquisa foi desenvolvida em conjunto pelo Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do RS (DAER/RS) e pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para desenvolver o simulador de tráfego da UFRGS – DAER foram estudadas as principais características dos simuladores em operação à época a nível mundial. A equipe da UFRGS e do DAER optaram por um simulador de tamanho médio, com o objetivo de reproduzir o mais real possível, o efeito do tráfego sobre uma estrutura de pavimento. O simulador da UFRGS – DAER/RS é semelhante ao ALF (Accelerated Loading Facility), norte americano. Conforme CERATTI et al. (2000) o projeto foi

desenvolvido pelo Grupo de Projeto Mecânico e Avaliação Industrial (GPA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS.

O simulador de tráfego UFRGS – DAER/RS apresenta as seguintes características (NUÑEZ, 1997):

- × Velocidade de deslocamento regulável (até 10km/h);
- × Carga máxima aplicável: 65kN;
- × Comprimento: 15m;
- × Largura: 2,5m;
- × Altura: 4,3m;
- × Espaço de aplicação da carga sobre o pavimento: 8m;
- × Espaço de aceleração e desaceleração: 3m;
- × Sistema de rodado: simples ou duplo;
- × Tipo de carregamento aplicado: linear, unidirecional e não tracionado;
- × Princípio de aplicação de cargas: hidráulico;
- × Princípio de acionamento geral: elétrico.

O simulador de tráfego da UFRGS é formado por diversos sistemas descritos por NUÑEZ (1997) em sua tese de doutorado, defendida em dezembro de 1997, e reproduzido a seguir:

- × Sistema de Guiamento do Rodado: "O rodado pode ser simples ou duplo, o carro desloca-se sobre trilhos, tracionados por cabos de aço. Este carro possui 5 rodas laterais que promovem o seu guiamento, sendo que três delas servem para o guiamento da carga e as outras duas rodas servem para o guiamento durante o retorno do carro, durante o ciclo de aplicação".



- × Sistema de Aplicação de Carga: "A aplicada de carga se faz através de uma unidade hidráulica, comandada eletricamente por um cilindro hidráulico. O sistema de aplicação de carga se dá com deslocamento em um único sentido (unidirecional), e o retorno do carro se dá com o rodado suspenso".
- × Sistema de Amortecimento: "O sistema de amortecimento é um dispositivo de segurança composto de molas helicoidais fixadas nas extremidades dos trilhos de guiamento e tem como função principal a parada com segurança do carro, prevenindo uma provável falha no sistema de controle".
- × Sistema de Acionamento: "O sistema é acionado por um motor de indução trifásica de rotor bobinado, possui freios eletromagnéticos, com potência de 15CV e um redutor com redução de 1:9,4. Este conjunto aciona um tambor ao qual está ligado o cabo de aço que movimenta o carro. O cabo de aço possui um mecanismo em uma das extremidades com a finalidade de mantê-lo sempre esticado".
- × Sistema de Rodado: "O sistema de rodado do carro é ligado ao carro por um garfo articulado, este rodado possui um semi – eixo de caminhão na extremidade. O semi - eixo é regulável de forma a permitir o alinhamento do rodado. São utilizados rodados comerciais de caminhões".
- × Estrutura de Suporte Geral: "Esta estrutura serve de reação às cargas, e é apoiada sobre duas vigas – caixão localizado na extremidade do simulador, a estrutura é composta por painéis Bailey tipo BB.1 sobreposto".
- × Sistema de Controle: "O sistema de controle é composto por um quadro de comando elétrico com grau de proteção e através de um microprocessador programável acoplado, aciona todos os sistemas integrantes do simulador de tráfego. Também possui um quadro de resistores, que tem como função o controle da velocidade do acionamento".
- × Sistema de Aceleração e Desaceleração: "O sistema de aceleração e desaceleração de deslocamento do carro é comandado pelo sistema de controle, através do acionamento do freio do motor elétrico, e segundo um

sinal elétrico originário de sensores fotoelétricos, instalados ao longo dos trilhos de guiamento do carro”.

- × Sistema de Deslocamento Transversal: “O equipamento possui um deslocamento transversal, de forma a impedir a formação de afundamentos de trilhas de roda pela passagem das rodas em um único local. Este deslocamento ocorre toda vez que o rodado retorna suspenso para o início de cada ciclo. O deslocamento ocorre sobre roletes fixos à viga de apoio da estrutura e o sistema de acionamento é feito por um motor elétrico de 3CV com redutor, instalado nesta viga, em cada extremidade do equipamento”.

O simulador de tráfego da UFRGS – DAER/RS está instalado em uma Área de Testes de Pavimentos, no campus da UFRGS, conforme mostra a Figura 2.4. Nesta área é possível a execução de 9 pistas experimentais com 3 metros de largura e 20 metros de comprimento cada. O acionamento e controle do simulador de tráfego são feitos em uma central localizada próximo às pistas, neste local também está instalado o quadro de comando elétrico.



Figura 2.4 - Simulador de Tráfego da UFRGS – DAER/RS

#### *2.1.1.2.1 Estudos desenvolvidos com o Simulador de Tráfego UFRGS – DAER/RS*

A primeira pesquisa realizada com a utilização do Simulador de Tráfego da UFRGS – DAER/RS, foi realizada por NUÑEZ (1997). O objetivo da pesquisa era analisar a capacidade do basalto alterado como material para rodovias de baixo volume de tráfego no Estado do Rio Grande do Sul.

De acordo com NUÑEZ (1997), o desempenho de pavimentos com camadas de basalto alterado, avaliados nas pistas experimentais foi satisfatório, possibilitando a indicação do emprego do material para pavimentação extensiva de rodovias coletoras, com garantia de boa qualidade técnica e notável economia.

No ano de 1999 a UFRGS, o DAER/RS e a empresa Ober S.A., desenvolveram um estudo para comparar o processo de reflexão de trincas em recapeamentos asfálticos executados sobre pavimentos trincados, com a utilização do simulador de tráfego da UFRGS – DAER/RS. Na ocasião foi construída uma pista experimental com revestimentos de concreto asfáltico, no qual foram serradas trincas para simular a fadiga. Esta pista foi dividida em três segmentos, sendo que em duas foram colocadas mantas de geotêxteis de diferentes características, como camada intermediária e no outro segmento foi executado o reforço diretamente sobre a camada trincada.

Os resultados obtidos por VIERA (2000) constataram que a inclusão do geotêxtil não tecido agiu como elemento retardador da propagação das trincas por fadiga e como membrana impermeável. E que a utilização dessa tecnologia pode se refletir em uma economia inicial com a redução da camada asfáltica de reforço, ou ao longo do tempo com o aumento da vida útil do pavimento.

Outro trabalho realizado com o Simulador está descrito em GONÇALVES (2002). Para este estudo foi feita uma instrumentação em seis seções experimentais com revestimentos constituídos por misturas de concreto asfáltico convencional e modificados por polímeros. Porém destas seis seções apenas duas foram submetidas aos esforços das cargas do tráfego durante este estudo. Estas seções foram monitoradas com medidores de tensões e deformações, instalados em diferentes pontos.

A reflexão de trincas é considerada um dos maiores problemas a serem resolvidos na restauração de rodovias. Este fenômeno ocorre na interligação das micro fissuras da massa asfáltica, devido à repetição dos ciclos de carga. Em geral, os movimentos causados pela reflexão de trincas decorrem dos deslocamentos verticais diferentes entre as paredes de uma trinca na passagem de carga de roda, ocorrendo a deformações cisalhantes na camada do recapeamento, e os movimentos horizontais de abertura e fechamento de trinca devido à variação de temperatura, entre outros.

Para observar estas situações de reflexão de trinca AZAMBUJA (2004) realizou um estudo sobre o desempenho de uma estrutura de pavimentos, recapeado em tratamento superficial duplo – TSD, através de ensaios acelerados com a utilização do Simulador de Tráfego linear da UFRGS – DAER/RS, em escala real.

Para a realização da pesquisa foi utilizada uma das pistas estudada por GONÇALVES (2002), onde foram executadas quatro áreas de trincamento artificial, com uma serra circular, semelhante ao padrão de trincamento causado por fadiga. O estudo também foi monitorado com células de carga, strain-gages e sensores de temperatura. Foi utilizada a carga total do eixo de 100kN com o objetivo de acelerar o processo de degradação. A atuação do trem de carga foi de abril a junho de 2003 totalizando  $1,2 \times 10^5$  ciclos de carga. As deflexões máximas evoluíram depois dos 70.000 ciclos de carga, e o fenômeno de reflexões de trincas foi percebido até os primeiros 30.000 ciclos da carga aproximadamente. Após os 40.000 ciclos, as velocidades de trincamento em áreas trincadas e não trincadas previamente começaram a se aproximar, deduzindo-se que o trincamento foi causado pela fadiga de todo o revestimento asfáltico.

WICKBOLDT (2005) realizou um estudo que avaliou através de ensaios acelerados o comportamento de misturas asfálticas modificadas com borracha.

#### 2.1.1.3 Simuladores de tráfego de grande porte

Os simuladores de grande porte, assim como os de médio, operam em lugares a céu aberto. Na década de 1940 um simulador de tráfego de grande porte foi usado num

estudo de desenvolvimento do método Marshall. Alguns exemplos de simuladores de grande porte de primeira geração (FRITZEN, 2005) são:

- ✦ Nova Zelândia - Universidade Canterbury (1970): possui um anel octogonal com diâmetro de 20m e dois conjuntos de rodas duplas, o deslocamento lateral da carga é realizada através de pesos de concreto, e esta carga varia de 13,3kN a 40kN a uma velocidade de 20km/h.
- ✦ Universidade do estado de Washington (1970): possui três conjuntos de rodas duplas, tem diâmetro de 26m, as rodas externas são livres e as internas são tracionadas deslocando lateralmente.
- ✦ Universidade do estado Pennsylvânia (1970): é um circuito oval com 1,3km de extensão.
- ✦ Suíça (1970): possui três braços radiais com rodas duplas com diâmetro de 32m e sua carga é de 50kN.
- ✦ França – LCPC – (NANTES): o mais completo com diâmetro de 41m, a largura da pista é de 6m, possui 4 braços com rodas duplas e seu deslocamento é lateral.

No Brasil, o Simulador IPR/DNER pode ser considerado como um simulador de tráfego de grande porte. A construção da pista experimental do IPR/DNER com simulador circular foi a primeira realizada no Brasil. Na década de 1970 foram analisados pelos pesquisadores do IPR diferentes tipos de pistas experimentais e simuladores de tráfego existentes à época no mundo, verificando vantagens e desvantagens, através de detalhes de projeto, fotografias, publicações e visitas nos Estados Unidos, Inglaterra, Portugal e França.

Pistas experimentais circulares dos Estados Unidos, Inglaterra, Tchecoslováquia, Argentina, México e Hungria, ajudaram o IPR/DNER a optar pela construção de uma pista experimental circular, do tipo carrossel, semelhante à existente na Washington State University – WSU, na cidade de Pullman, Estado de Washington (SILVA, 2001).

No ano de 1975 iniciou-se o projeto de construção da pista que foi instalada no Centro Rodoviário em Parada de Lucas – km 163 da Rodovia Presidente Dutra – Rio de Janeiro. A Pista Circular Experimental do IPR/DNER é constituída por um conjunto de sistemas móveis e de instalações fixas conforme Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 tendo como principais componentes:

- ✖ Trem de prova;
- ✖ Conversor de CA / CC;
- ✖ Quadros de comando e de força;
- ✖ Sistema de transmissão de energia elétrica;
- ✖ Pavimento teste;
- ✖ Laboratório de mecânica e de eletro-eletrônico;
- ✖ Instalações prediais.

O trem de prova do Simulador Circular do IPR/DNER possui três braços conforme mostra a Figura 2.7.

Segundo SILVA (2001) o trem de prova é constituído por uma treliça metálica, dotada de uma armadura central, em forma hexagonal, com 2,40m de lado, à qual estão fixados três braços com 12,9m cada. Na extremidade de cada braço, está montado um sistema completo de acionamento, constituído por um motor de 60CV, CC, arrefecido por ventoinha elétrica, ao qual estão conectados uma caixa de redução, mancais, eixo cardan, sistema de feixe de molas planas, conjunto de rodas duplas dotadas de pneus 1100R22 e sistema de regulação das rodas.

SILVA (2001) descreve o simulador de tráfego do IPR como: “Sob o hexágono central da treliça, está montado o mecanismo do excêntrico, que permite o deslocamento lateral do trem de prova, a cada giro deste, com amplitude regulável, de 0 a 2,20m. Este sistema é formado por uma corrente guia, base móvel de apoio, caixa de redução, cabo flexível, cinco engrenagens e duas correntes metálicas.



Figura 2.5 – Simulador Circular do IPR/DNER

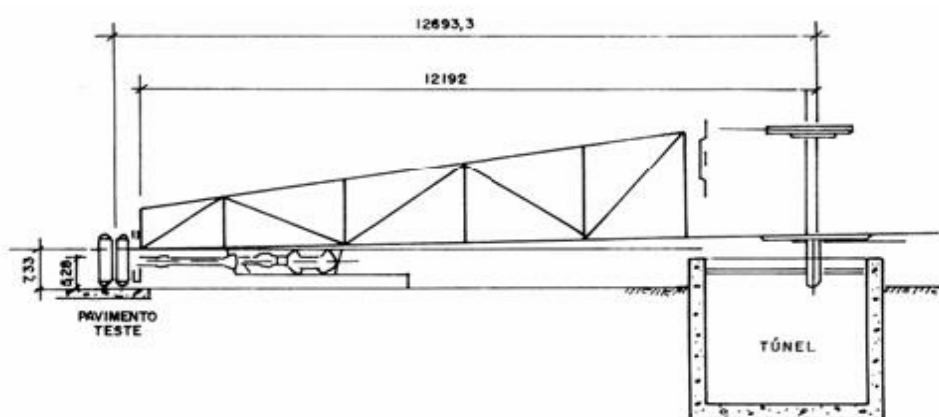


Figura 2.6 – Detalhes Braços do Trem de Prova – TP, IPR/DNER





Figura 2.7 – Vista Superior da Pista Circular Experimental do IPR /DNER

No centro do hexágono, está fixado o eixo do trem de prova, que atua em um conjunto com bucha e mancal móveis. No prolongamento inferior deste eixo está montado o coletor de energia elétrica, com 28 anéis e respectivas escovas, através do qual a energia elétrica é transmitida do conversor e quadros de comando e força para o sistema de propulsão do trem de prova.

A ligação de energia elétrica entre o conversor e os quadros de comando e força, com os sistemas de propulsão do trem de prova, é feita através do coletor, por meio de cabos elétricos, assentes em calhas metálicas especiais. Em um único gabinete metálico, está montado o conversor CA / CC, de 440 VAC de entrada, e saída ajustável de 0 a 500 VAC, com 144 kW de capacidade.

O trem de prova tem um peso total de 17,1tf, sendo apoiado em três conjuntos de rodas duplas, dotadas de pneus radiais, 1100R22, inflados a 105lb/pol<sup>2</sup>, com carga por conjunto de rodas de 5,7tf. A Tabela 2.1 mostra as características do Trem de Prova Circular do IPR /DNER. O equipamento de comando é alojado na sala de controle, construída adjacente à pista de modo a permitir uma visão completa da mesma.



Embora nominalmente o simulador possa em geral atingir 80km/h, a maioria dos experimentos já realizados na pista do IPR utilizou a velocidade de operação de 40km/h. Nesta velocidade, são aplicados ao pavimento pelos três conjuntos de rodas, aproximadamente 1500 carregamentos por hora. Para que se tenha uma cobertura completa da área transversal útil do pavimento, o centro de rotação da estrutura pode ser colocado excentricamente à pista girando lentamente, completando um círculo médio a cada perímetro de 80m e raio de 12,9m (correspondente ao braço do trem de prova). A largura da faixa do pavimento que pode ser solicitada pelo carregamento é ajustável de 0 a 2,2m, e a cada 760 giros do trem de prova, as rodas retornam ao ponto inicial do deslocamento transversal.

#### *2.1.1.3.1 Estudos desenvolvidos com o Simulador de Tráfego IPR/DNER*

O instituto de Pesquisa Rodoviário – IPR, após o término da construção da Pista Circular Experimental em 1979, iniciou um programa de pesquisa. A partir deste ano o IPR realizou vários estudos que tem ajudado a entender melhor o comportamento dos materiais utilizados na pavimentação, contando com a participação e supervisão do Professor Salomão Pinto.

PINTO (2005, APUD FRITZEN, 2005) faz o relato da pesquisa mais recente na pista circular do IPR que teve início em 2002 e teve como objetivo verificar se asfaltos Multigrade produzidos no Chile possuem propriedades reológicas melhoradas quando comparadas ao CAP40, produzido no Brasil, proporcionando um melhor desempenho do pavimento. Esta pesquisa foi realizada no simulador de tráfego da Pista Circular Experimental com a seguinte estrutura: subleito de argila amarela, base com 20cm de espessura de Brita Graduada – BG, concreto asfáltico com 5cm de espessura, Whitetopping com 15cm de espessura e sobre este os materiais a serem testados. Essas condições foram iguais para os dois tipos de ligantes. A pista foi dividida em duas partes tendo a metade da pista 5cm de espessura de concreto asfáltico com a utilização do CAP40 e a outra metade da pista com 5cm de espessura de concreto asfáltico com a utilização do asfalto Chileno – Multigrade.

Monitorou-se o desempenho quanto à deformação permanente (através da evolução da flecha máxima) e das propriedades dos ligantes (Penetração 25°C, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Absoluta 60°C) e ensaios mecânicos de tração indireta e módulo de resiliência. As misturas com CAP40 e com o Asfalto Multigrade, foram comparadas nas mesmas condições de temperatura, teor de ligante, granulometria e tipo dos agregados. Esta pesquisa teve a duração de um ano, com a finalização dos trabalhos em dezembro de 2003.

### **2.1.2 Outros estudos envolvendo ensaios acelerados e o desempenho de pavimentos**

Avanços significativos da engenharia de pavimentos devem-se a conclusões estabelecidas a partir de investigações das respostas oferecidas por estruturas observadas em verdadeira grandeza. O exemplo clássico é a aplicação prática ainda nos tempos atuais dos resultados derivados das interpretações realizadas nos ensaios desenvolvidos pela AASHO Road Test. Essa pesquisa foi desenvolvida nos Estados Unidos, próximo de Ottawa, Illinois, por um período de dois anos (entre outubro de 1958 e novembro de 1960). Foram construídas 468 seções de pavimentos flexíveis e 368 seções de pavimentos rígidos. Sendo aplicadas 1.114.000 repetições de vários tipos de eixos de carga.

Muitos dos procedimentos utilizados para o dimensionamento de estruturas de pavimentos empregados em vários países do mundo foram estabelecidos com base nos resultados obtidos na pista experimental da AASHO Road Test. No Brasil, assim como em outros países com condições climáticas e de constituição dos materiais utilizados para pavimentação diferentes daquelas da pista experimental construída em Illinois, os resultados empíricos derivados dos ensaios da AASHO Road Test precisam ser cuidadosamente interpretados, sob pena de comprometimentos sérios no que se refere à expectativa de desempenho obtida, nestes locais com condições diferentes. Neste sentido, pesquisadores de diversas partes do mundo vêm se esforçando para definir as suas próprias equações de dimensionamento que

permitam levar em conta aspectos fundamentais como características dos materiais e parâmetros climáticos locais.

Nos últimos anos, no sentido de avaliar o desempenho de pavimentos em serviço, diversos estudos têm sido feitos envolvendo a construção de pistas experimentais e a realização de ensaios acelerados de pavimentos. Para tanto, foram planejados e desenvolvidos diversos programas de pesquisa. Dentre os mais expressivos, podem ser citados: Nardo Road Test, Corpo dos Engenheiros do Exército Americano, Pista Experimental de Nantes, Virtta Test Track, Alberta Research Council e Pista Experimental de Madri. O propósito comum destas pesquisas é possibilitar a obtenção de parâmetros fundamentais, através dos quais se possa racionalizar as etapas de projeto e avaliação de pavimentos.

Outro programa interessante desenvolvido em escala real foi realizado no Campo de Testes de Nardo, Nardo, Itália em 1984. O programa de testes, inicialmente preocupado com a realização de medidas de deformação em camadas asfálticas, envolveu o esforço de pesquisadores de 10 países. Sendo que cada equipe apresentou seus próprios objetivos e utilizou projetos individuais de instrumentos.

Durante a construção da camada de concreto asfáltico, para permitir uma taxa elevada de sobrevivência dos sensores, foram adotados cuidados especiais como utilização de compactador não vibratório e baixa temperatura da mistura asfáltica. A taxa de mortalidade pós-construção ficou em torno de 13% (foram instalados 200 sensores). O sucesso variou de equipe para equipe de acordo com a atenção destinada à proteção dos instrumentos. A maioria desses foram presumidamente sucumbido pela intrusão de agregados. Mesmo com as precauções adotadas, foram registradas perdas significativas durante a construção, principalmente com os sensores cuja proteção era de alumínio. Os testes realizados em Nardo não servem para refletir condições reais de pavimentos em serviço devido, principalmente, às precauções de proteção adotadas durante a construção (compactação e temperatura da mistura).

Também merecem destaque as pistas de testes de pavimentos construídas em Madri, na Espanha, Nantes, na França, e em Nevada, nos Estados Unidos, as quais

possibilitam que sejam realizados ensaios acelerados em pavimentos rodoviários em escala real. Na pista de Nevada, os ensaios consistem em fazer trafegar veículos sobre os pavimentos de modo a poder analisar suas respostas ante as cargas e acompanhar o surgimento e evolução de defeitos. Já nas pistas de Nantes e de Madri, são utilizados simuladores de tráfego.

As instalações concebidas permitem ensaiar e comparar estruturas distintas de pavimentos simultaneamente. Seus principais objetivos são a calibração de métodos analíticos de dimensionamento, avaliação de pavimentos, comparação da capacidade de suporte e vidas de serviço de diferentes seções estruturais de pavimentos, comparação de diferentes tipos de revestimentos, medição de tensões e deformações em pontos críticos das estruturas, verificações e calibração de modelos teóricos de desempenho de pavimentos e investigação do comportamento de novos materiais para rodovias.

Na Pista de Testes de Madri existem seis seções de ensaios de 25 metros cada, situadas nos trechos retos. As seções foram construídas com materiais e equipamentos comumente utilizados nas rodovias espanholas. A simulação do tráfego é realizada por dois simuladores de tráfego guiados por uma viga de concreto. As características dos simuladores correspondem as de um caminhão com máxima carga legal permitida na Espanha.

As respostas do pavimento, quando submetido às cargas do tráfego e sua evolução com o tempo, são medidas por instrumentos instalados no pavimento. O sistema de aquisição de dados existente está preparado para monitorar até 400 sensores. O centro de controle, completamente automatizado, situa-se na parte interna da pista oval. A capacidade inicial de aplicação de cargas (um milhão de ciclos ao ano para cada simulador de tráfego) deve ser dobrada com a possibilidade da circulação simultânea dos dois simuladores de tráfego. As principais características do Centro de Testes de Madri são:

- ✕ Distância total de ensaio de 150 m;

- × Seções de ensaios com largura de 8 m e 2,6 m de profundidade, construídas sobre uma plataforma de concreto em forma de U;
- × As seções são cobertas e existe um dispositivo que permite a simulação de chuvas;
- × Dois veículos simuladores de tráfego pesado. Características: carga por gravidade, semi-eixo simples, velocidade de 60 km/h, largura de atuação de 1,3 m, carga variável entre 55 e 75 kN;
- × O controle dos simuladores de tráfego é realizado através de um programa específico com transmissão das ações via cabo com funcionamento totalmente automático não sendo necessária presença contínua de pessoal.

Uma extensa pesquisa envolvendo ensaios acelerados em escala real em estruturas de pavimentos foi realizada pelo LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) e pela Scétauroute (Agência Francesa de Engenharia Rodoviária) entre os anos de 1990 e 1994. O propósito principal dos estudos realizados era estabelecer correlações acerca do desempenho oferecido em termos de trincamento por fadiga de misturas asfálticas aplicadas em diferentes configurações geométricas. Ao todo, foram aplicadas em torno de 7 x 10<sup>6</sup> repetições de cargas com o simulador de tráfego circular do LCPC em 12 seções experimentais de pavimentos.

Características comuns aos testes realizados incluem:

- × Nível de carregamento aplicado de 65 kN;
- × Pressão de inflação dos pneus de 0,8 MPa;
- × Deslocamento transversal do trem de provas de 1 metro;
- × Foram testadas 4 diferentes estruturas em cada ensaio;
- × A fonte dos agregados utilizados nas composições asfálticas foi a mesma para todas as estruturas;
- × A sub-base é a mesma para todas as seções (40 cm de material granular);

- × O subleito é constituído por material com valores de CBR entre 5% e 10%;
- × Velocidade do tráfego entre 60,6 e 72,0 km/h.

Nos três conjuntos de experimentos realizados na pista circular do LCPC, as deformações medidas na direção longitudinal em relação ao deslocamento do trem de provas são bem superiores às deformações medidas na direção transversal. Concordando, de acordo com os autores, com a aparência do trincamento observado nos pavimentos experimentais, o qual ocorreu de modo preponderante na direção transversal ao deslocamento do tráfego.

BROWN & BRODRICK (1999) relatam os resultados obtidos nos estudos envolvendo ensaios acelerados de pavimentos desenvolvidos ao longo de 25 anos em Nottingham, na Inglaterra. Também apresentam um histórico acerca da utilização de simuladores de tráfego na Inglaterra desde a construção da primeira máquina projetada para provocar a deterioração acelerada de pavimentos, no ano de 1912 no antigo National Physical Laboratory.

Durante as décadas de 70 e 80, foram realizadas pesquisas importantes em diversos outros países (os resultados dos ensaios acelerados obtidos foram significativamente mais importantes que nos EUA). Contribuições significativas foram feitas pela Austrália, Dinamarca, África do Sul, França e Inglaterra.

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

Ainda, de acordo com HORAK et al. (1999), na Engenharia de pavimentos, nota-se uma freqüente falta de comunicação entre as atividades de pesquisa e a prática rodoviária. Tal entendimento pode ser visto como um elemento-chave para a transferência de tecnologia derivada de pesquisas e conseqüente inovação tecnológica. Portanto, a associação entre pesquisadores e profissionais da prática rodoviária torna-se indispensável para a racionalização das atividades relacionadas à pavimentação. O HVS da África do Sul provou ser um elemento adequado para promover tal interação entre profissionais que atuam em atividades complementares de pesquisa e prática rodoviária.

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

## 2.2 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Para melhor compreensão do nível com que o pavimento atende as exigências mínimas para a qual foi concebido inicialmente, é preciso usar dois conceitos fundamentais estabelecidos nesse processo, que são a serventia e o desempenho:

- × Serventia: é o grau com que o pavimento atende aos requisitos de conforto ao rolamento e segurança, nas velocidades operacionais da via e em um determinado momento de sua vida de serviço. No método da AASHTO, adota-se uma escala de 0 a 5 para quantificar o nível de serventia. Esta escala indica, quanto mais próximo do 5 melhor o estado do pavimento e quanto mais próximo do 0 pior é o estado do pavimento. Este grau é avaliado subjetivamente, sendo denominado de Present Serviceability Rating (PSR).

Quando o PSR é calculado por meio de correlações com defeitos de superfície ou com a irregularidade, é denominado Present Serviceability Index (PSI).

- × Desempenho: é a variação da serventia ao longo do tempo (PSI x Tempo). Em algumas situações, especialmente em Sistemas de Gerenciamento de Pavimentos em nível de rede, é conveniente quantificar-se o desempenho através da área sob a curva de variação do PSI ao longo do tempo. Também existe a preocupação adicional com relação ao desempenho estrutural, entendido como o tempo em que um pavimento resiste ao trincamento e ao acúmulo de deformações plásticas, quando submetido a um certo tráfego (GONÇALVES, 1999).

Desempenho é um termo genérico que é utilizado para designar como os pavimentos mudam de condição ou servem sua função com o uso e o decorrer do tempo. A sua definição exata varia com o nível de gerência em que é utilizado (rede ou projeto). A importância de se prever, da forma mais exata possível, a degradação futura de um pavimento é essencialmente econômica: há uma demanda crescente em todo o mundo pelo desenvolvimento e aplicação de técnicas de gerenciamento e de planejamento mais eficazes, bem como por uma justificativa em termos econômicos para os investimentos e para os padrões de serventia dentro do setor rodoviário, envolvendo custos e benefícios (RODRIGUES, 2003).

De forma ampliada, o desempenho de um pavimento depende de uma série de fatores e vários indicadores podem ser utilizados para quantificá-lo: desde indicadores da sua condição funcional tais como aqueles que consistem em mapear os defeitos de superfície ou as deformações plásticas, até indicadores da condição estrutural.

O desempenho estrutural pode ser avaliado através da variação do módulo de elasticidade efetivo de uma ou mais camadas, especialmente as misturas asfálticas e as cimentadas, com o tráfego acumulado (RODRIGUES, 1995).

Os fatores que influenciam no desempenho dos pavimentos são associados a:

- × Estrutura;



- × Clima;
- × Drenagem;
- × Tráfego:
  - número de operações
  - cargas;
  - velocidades;
- × Variabilidade na Construção.

O pavimento é uma estrutura bastante complexa no que diz respeito à previsão de seu desempenho futuro. Num sistema de gerência as necessidades futuras de manutenção só podem ser determinadas se dispuser de modelos de previsão de desempenho suficientemente confiáveis.

Um dos principais problemas da tecnologia da pavimentação é encontrar a relação existente entre as características da estrutura do pavimento (seção do pavimento, processos construtivos, condições de drenagem e os materiais de construção utilizados), as condições climáticas e de tráfego a que ele estará submetido e o desempenho que se pode esperar para o pavimento. Neste sentido, os métodos de projetos empíricos têm aplicabilidade limitada e os modelos mecanísticos – empíricos existentes têm problemas para definir o chamado fator laboratório - campo que aproxime as previsões feitas com base em ensaios realizados em corpos-de-prova de pequenas dimensões, em condições particulares de carregamento e análise de tráfego (parte mecanística) com o desempenho de campo sob o clima e as condições do tráfego real (parte empírica).

A elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos rodoviários é de fundamental importância para o planejamento de investimentos quando se tem um orçamento limitado.

## **2.2.1 Mecanismos de deterioração de pavimentos asfálticos**

### **2.2.1.1 Fadiga de misturas asfálticas**

O principal mecanismo de ruptura de pavimentos flexíveis no Brasil é a fadiga do revestimento asfáltico sob a ação das cargas repetidas de tráfego. O fenômeno da fadiga é definido como um processo de deterioração estrutural, que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

O trincamento por fadiga é uma das mais comuns manifestações de mau desempenho ou ruptura de um pavimento, manifesta-se através do aparecimento de trincas longitudinais nas trilhas de roda e propaga-se pela superfície do pavimento na forma de trincas interligadas tipo couro de jacaré. As trincas podem ter seu início, através de forças cisalhantes, na superfície do pavimento ou de tensões de tração, na fibra inferior da camada asfáltica. As características à fadiga são comumente expressas em relação à tensão ou deformação inicial atuante e o número de repetições de carga até a ruptura.

É extremamente importante a caracterização de uma mistura sob condições peculiares de tráfego, estrutura, condições ambientais e propriedades de envelhecimento a que cada material estará sujeito. Muitas destas variáveis são expressas por meio de fatores semi-empíricos.

Inúmeros trabalhos voltados ao estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas têm sido realizados nas últimas décadas. Os esforços têm sido concentrados na incorporação das descobertas destas pesquisas em procedimentos de projeto de pavimentos. O ponto de partida para tanto, é a realização de ensaios

de laboratório para determinação da vida de fadiga e, posteriormente, a determinação de fatores campo-laboratório, de maneira a correlacionar os dados obtidos experimentalmente em ensaios de laboratório para situação de campo.

A estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas, pode ser feita com ensaios laboratoriais que procuram simular as condições de solicitação de uma rodovia ou procuram uma aproximação fundamentada. Estes ensaios são divididos em dois grupos: o primeiro é executado em placas ou vigas apoiadas em suporte que visam representar as camadas subjacentes ao revestimento e o segundo são os ensaios de laboratório executado em corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos, submetidos a níveis de tensões ou deformações que simulam as condições de solicitações no campo.

Os métodos de ensaios de fadiga podem ser classificados em função do carregamento, PINTO, 1991):

- ✖ Condição de Carga:

- Estática;
- Dinâmica.

- ✖ Tipos de Carga:

- Compressão simples;
- Compressão diametral;
- Tração;
- Flexão simples ou em balanço;
- Triaxial;
- Rotativo.

Os fatores que afetam a vida de fadiga de mistura asfáltica são (PINTO, 1991):

× Fatores de Carga:

- Magnitude do carregamento;
- Tipo do carregamento;
- Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento;
- Tipos de tensões;
- Forma do carregamento.

× Fatores de Mistura:

- Tipo do agregado, forma e textura;
- Granulometria do agregado;
- Penetração do asfalto;
- Teor de asfalto;
- Temperatura.

× Fatores Ambientais:

- Temperatura;
- Umidade.

× Outras Variáveis:

- Módulo de resiliência ou de rigidez;
- Índice de vazios.

PINTO (1991) realizou um estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas utilizando ensaios à compressão diametral e à flexão alternada sob tensão e

deformação controladas, verificando também a influência da temperatura na resistência à fadiga. Definiu também modelos estatísticos relacionando as propriedades dos asfaltos e das misturas às características de ruptura dos concretos betuminosos a partir de ensaios de fluência estática (creep), permitindo definir os componentes de deformação total através de carregamento e descarregamento a longos períodos.

PINTO (1991) estabeleceu modelo analítico – empírico para o fator laboratório - campo, a partir de ensaios de fadiga realizados no laboratório e de observações no campo. Esse fator se caracteriza por valores de 102 a 104 para levar o pavimento a 20% de área trincada, valores estes que serão incorporados aos modelos de fadiga determinados em ensaios de carga repetida.

A correlação entre a análise teórica e o desempenho real dos pavimentos é fundamental no desenvolvimento de métodos de projeto, permitindo ao projetista rodoviário a avaliação de um grande número de projetos e estratégias de restauração, podendo assim identificar com facilidade a melhor alternativa, calcada em fundamentos decorrentes do estudo da mecânica dos pavimentos.

#### *2.2.1.1.1 Determinação da vida de fadiga em laboratório*

Para se determinar a vida de fadiga em laboratório, de determinada massa asfáltica dois procedimentos podem ser adotados:

1- Determinação da vida de fadiga a tensão controlada (TC) – Neste ensaio diversos níveis de tensão inferiores a tensão de ruptura são aplicados a corpos de provas moldados nas mesmas condições, obtendo-se pares ordenados de nível de tensão versus número de repetições necessárias para que haja a ruptura do corpo de prova. Quanto maior o nível de tensão em relação à tensão de ruptura, menor o número de ciclos necessários para que ocorra o rompimento do corpo de prova.

2- Determinação da vida de fadiga a deformação controlada (DC) – Neste caso, da mesma forma que o anterior, diversos corpos de prova são moldados nas mesmas

condições e submetidos a diversos níveis de deformação específica constante, anotando-se o número de repetições necessárias para que a tensão inicial aplicada seja reduzida, por exemplo, a 50 ou 30% da tensão inicial. Assim, também, obtém-se pares ordenados de deformação específica inicial versus número de 59 aplicações de carga para se alcançar determinada tensão mínima no corpo de prova.

A vida de fadiga à tensão controlada (TC) pode ser expressa pela seguinte equação:

$$N = K_1 = \left( \frac{1}{\sigma_{ii}} \right)^{n_1}$$

e a vida de fadiga a deformação controlada (DC) pela seguinte equação:

$$N = K_2 = \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2}$$

onde:

N = Vida de fadiga

K1, K2, n1, n2 = Parâmetros determinados em ensaios

$\sigma_{ii}$  e  $\varepsilon_i$  = tensão de tração inicial e deformação específica inicial

Estas expressões vão diferir nos parâmetros  $K_i$  e  $n_i$  dependendo do tipo de ensaio realizado: compressão diametral, flexão ou tração. Considerando-se um regime de tensão controlada, MOTTA (1991) propôs as equações de fadiga de laboratório (NI) expressas nos modelos apresentados a seguir, em função da diferença de tensões aplicadas ao revestimento.

Para a extrapolação desta vida de fadiga para a vida de fadiga de campo  $N_c$ , PINTO (1991) propôs um fator campo-laboratório, variando de  $fcl = 103$  à  $fcl = 104$ , ou seja  $N_c = fcl \times NI$

Para módulo de revestimento de 10.000 kgf/cm<sup>2</sup> (1000 MPa)

$$NI = 9,3 \times 10^5 (\Delta \sigma)^{-3,4}$$

Considerando-se  $NI=N_c / 104$ :

$$N_c = 108 \text{ à } \Delta\sigma \text{ admissível} = 3,79 \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_c = 107 \text{ à } \Delta\sigma \text{ admissível} = 7,47 \text{ kgf/cm}^2$$

Para módulo de revestimento de 30.000 kgf/cm<sup>2</sup> (3000 MPa)

$$NI = 1,5 \times 10^7 (\Delta\sigma)^{-3,68}$$

Considerando-se  $NI=N_c / 104$ :

$$N_c = 108 \text{ à } \Delta\sigma \text{ admissível} = 7,30 \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_c = 107 \text{ à } \Delta\sigma \text{ admissível} = 13,64 \text{ kgf/cm}^2$$

Para módulo de revestimento de 60.000 kgf/cm<sup>2</sup> (6000 MPa)

$$NI = 2,67 \times 10^6 (\Delta\sigma)^{-2,65}$$

Considerando-se  $NI=N_c / 104$ :

$$N_c = 108 \text{ à } \Delta\sigma \text{ admissível} = 8,24 \text{ kgf/cm}^2$$

$$N_c = 107 \text{ à } \Delta\sigma \text{ admissível} = 19,63 \text{ kgf/cm}^2$$

PINTO (1991) propôs a seguinte expressão para o cálculo da vida de fadiga:

$$NI = 9,07 \times 10^{-9} \left( \frac{1}{\epsilon t} \right)^{2,65} \left( \frac{1}{Mr} \right)^{-0,033}$$

onde:

$NI$  = Vida de fadiga em laboratório

$\epsilon t$  = deformação específica

$M_r$  = Módulo resiliente em (kgf/cm<sup>2</sup>)

#### 2.2.2.1.2 Outros modelos de fadiga

Dado à morosidade dos ensaios de fadiga em laboratório, os quais levam em média 30 – 60 dias para a finalização de um modelo para um único material, encontram-se modelos na literatura nacional e internacional, para a previsão da vida de fadiga. Muitos são os procedimentos de dimensionamento de pavimentos que incorporam tais modelos em suas formulações. A seguir, são citados alguns dos mais conhecidos.

O modelo da Shell Oil, apresentado a seguir, foi desenvolvido em 1978 e faz parte do manual de dimensionamento de pavimentos de rodovias da Shell.

$$N_f = 0,0685 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{5,671} \times \left( \frac{1}{E} \right)^{2,363}$$

Onde:

$N_f$  = número de repetições de carga para a ruptura por fadiga;

$E$  = módulo complexo da camada betuminosa, em psi;

$\varepsilon_t$  = deformação de tração na fibra inferior do revestimento, cm/cm.

O modelo do Asphalt Institute – MS-1- esta descrito a seguir para modelagem do efeito de fadiga em função do módulo dinâmico do concreto asfáltico.

$$N_f = 18,4 \left[ 4,325 \times 10^{-3} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot E^{-0,854} \right]$$

Onde:

$N_f$  = número equivalente de solicitações da carga do eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada de concreto asfáltico;

$\varepsilon_t$  = máxima deformação específica horizontal de tração na face inferior da na camada de concreto asfáltico, cm/cm;



$E$  = módulo dinâmico do concreto asfáltico

$f_o = 18,4$  – fator laboratório – campo.

O modelo de Berkeley, Califórnia segue a seguinte formulação:

$$N_f = 2,738 \times 10^5 \cdot e^{0,077B} \cdot \varepsilon_t^{-3,624} \cdot E_1^{-2,72}$$

Onde:

$B$  = teor de asfalto da mistura, em%.

$\varepsilon_t$  = deformação específica de tração na face inferior da camada betuminosa, cm/cm;

$E_1 = E \cdot \sin \phi$  – módulo de perda, em psi;

$E$  = módulo dinâmico da camada betuminosa, em psi;

$\phi$  = ângulo de fase, em graus;

#### 2.2.1.2 Reflexão de trincas

A reflexão de trincas é considerada um dos maiores problemas a serem resolvidos na restauração de rodovias. Diversos estudos experimentais e teóricos vêm sendo desenvolvidos em grandes centros de pesquisa, com a finalidade de procurar alternativas de modo a minimizar o efeito da reflexão de trincas em revestimentos asfálticos. Porém há ainda necessidade de estudos experimentais de laboratório e de campo no Brasil sobre o assunto.

Quando o potencial para ocorrência da reflexão de trincas em camadas asfálticas de recapeamento for elevado (isto é quando o grau de trincamento do pavimento antigo for grande e de alta severidade) tende a ser ineficaz, em termos econômicos, o simples aumento de espessura por sobreposição de uma nova camada asfáltica com o objetivo de se obter uma vida de serviço igual ao período de projeto. Neste sentido

um sistema anti - reflexão de trincas deve ser então concebido definindo-se a natureza dos materiais e as espessuras das camadas constituintes.

Algumas alternativas podem ser realizadas para reduzir a reflexão de trincas, ou seja, o reaparecimento das trincas existentes no revestimento antigo em curto espaço de tempo na nova camada de reforço, tais como:

- × Reciclagem do revestimento trincado com a finalidade de eliminar as trincas existentes, antes do recapeamento;
- × A utilização de geotêxteis como um retardador de trincas entre a camada de reciclagem e a camada do revestimento antigo;
- × Aumento da espessura da camada de recapeamento, de modo a atrasar a ascensão das trincas;
- × Camada intermediária com características específicas. Estudos feitos em trechos experimentais mostram que a interface entre a camada de recapeamento (reforço) e a camada de revestimento antigo é o melhor local para aplicar uma solução inibidora do mecanismo de reflexão de trinca (PINTO, 1991).

Uma vez que a trinca surja, ela aumenta de extensão, severidade e intensidade, levando, evidentemente, à desagregação do revestimento. Por meio desses efeitos, a velocidade de deterioração do pavimento é usualmente acelerada após o início do trincamento.

Neste sentido, um sistema Anti – Reflexão de Trincas deve ser concebido, definindo-se a natureza dos materiais e as espessuras das camadas constituintes. Estas técnicas costumam envolver o uso de camadas intermediárias especiais, colocadas entre a camada de recapeamento e o pavimento trincado.

PEREIRA (2002) apresenta algumas vantagens e desvantagens da utilização dos geotêxteis como camada anti - reflexão de trincas. A principal desvantagem é o escorregamento da manta, que é gerado por problemas executivos (taxa e ruptura da pintura de ligação inadequadas) e em zonas de desaceleração, curvas e mudanças de faixas.

Em situações onde a reflexão de trincas torna-se eminente, diferentes técnicas para restauração têm sido avaliadas com a finalidade de aumentar a vida de serviço da camada de recapeamento. Dentre elas podem ser citadas algumas:

- × Recapeamento convencional com aumento da espessura da camada;
- × Otimização ou modificação da mistura asfáltica;
- × Aplicações de camadas intermediárias de alívio de tensões;
- × Utilização de Sistemas de Reflexão Estrutural com Geogrelhas.

### 3 A RODOVIA BR-290/RS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DA RODOVIA

A estrutura de pavimento avaliada nesta pesquisa está situada no trecho da rodovia BR-290/RS que está, desde 1997, sob a concessão da Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – CONCEPA. A Figura 3.1 apresenta um mapa da localização da rodovia analisada.



Figura 3.1: Trecho das rodovias BR-290/RS E BR-116/RS analisado

### 3.1.1 Histórico da Rodovia BR-290/RS

A BR-290/RS é considerada a “espinha dorsal” do estado do Rio Grande do Sul, cruzando o estado do litoral norte em sentido oeste, até o município de Uruguai, na divisa com a Argentina, passando por Pantano Grande, São Gabriel e Alegrete. A rodovia é uma rota estratégica para o Mercosul e principal acesso a Porto Alegre e região metropolitana, sendo também a rota mais utilizada pelos motoristas que se destinam ao litoral, chegando a registrar movimento superior a 50 mil veículos em um único dia de verão.

O trecho da rodovia BR-290/RS entre Porto Alegre e Osório (segmento conhecido como “Free Way”) foi inaugurado em 1973 com o projeto grandioso de ser a primeira auto-estrada brasileira. Construída para ligar o litoral gaúcho à Capital, Porto Alegre, a rodovia nasceu na época em que o Governo Federal estava investindo em grandes obras rodoviárias.

Dotada, nesse trecho, de duas pistas de sentidos opostos separadas por um largo canteiro central, a rodovia apresenta um elevado padrão de qualidade, diferenciando-a de todas as demais rodovias do estado. O traçado da rodovia encontra-se em um relevo plano, possuindo, assim, raios amplos.

Logo após a sua inauguração, foi iniciada a cobrança de pedágios na rodovia. No entanto, os problemas no pavimento começaram a aparecer e o dinheiro arrecadado não conseguia suprir a carência. Em 1989 a cobrança de pedágio foi paralisada. Com inúmeros problemas mais graves e emergenciais em outros setores, o Governo Federal não possuía dinheiro para investir em suas rodovias, que estavam atingindo uma situação bastante crítica, como era o caso da BR-290/RS. A única saída encontrada para esse impasse foi realizar um programa de concessões.

Com a dificuldade do Governo Federal em dispor de recursos para a manutenção da malha rodoviária, foi criado em 1994 o Programa de Concessão Rodoviária, no qual a BR-290/RS foi incluída.

Em 1997 as construtoras Triunfo e SBS criaram oficialmente a empresa CONCEPA - Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A com o objetivo de administrar a

rodovia BR-290, no trecho entre Osório e Eldorado do Sul (totalizando 112 quilômetros da rodovia).

Com o início da concessão, passou-se a realizar novamente a cobrança do pedágio. Atualmente há três praças de cobrança de pedágio: em Santo Antônio da Patrulha (km 19), em Gravataí (km 77) e em Eldorado do Sul (km 110).

O pavimento do trecho concedido encontrava-se, em 1997, com inúmeros defeitos estruturais e funcionais, percebendo-se, desde então, que uma série de reparos e restaurações se faziam necessárias. A largura de sua plataforma de rolamento também estava inadequada para a capacidade de tráfego ao qual a rodovia era submetida nos verões. Antes da concessão, a rodovia possuía uma plataforma com 12m de largura. A segurança de tráfego também era comprometida pela inexistência de acostamento interno (à esquerda) e pela péssima condição que o pavimento se encontrava. Como melhoria em relação à segurança e conforto ao rolamento, a CONCEPA está ampliando a sua rodovia, aumentando a sua plataforma de tráfego de 12m para 16,25m (três faixas com 3,75m, com acostamento externo de 3m e acostamento interno – que não havia antes da concessão – de 2m, conforme Figura 3.2), sendo essa uma das principais obras a serem realizadas pela Concessionária ao longo de seu período de Concessão.

Como outras grandes melhorias proporcionadas pela concessão da rodovia, merecem ser destacados além da ampliação da plataforma de tráfego a execução do pavimento em whitetopping (pavimento de concreto de cimento Portland) em cerca de 15km da rodovia, o emprego em grande escala de asfaltos modificados, proporcionando melhorias à camada asfáltica e construção de um viaduto no acesso à cidade de Eldorado do Sul, próximo à capital Porto Alegre.

No ano de 2005, foi inserido no trecho de concessão da CONCEPA o segmento da rodovia BR-116/RS entre os km 291,2 e 299,9 (8,7km), juntamente com o Trevo de acesso à cidade de Guaíba (localizado no km 299,9). Como obras a serem realizadas nesse trecho incorporado à CONCEPA estão a recuperação do pavimento existente, a duplicação total do trecho através de execução de mais uma pista e a construção de dois viadutos no local de acesso à Guaíba, elevando o nível da BR-116/RS.

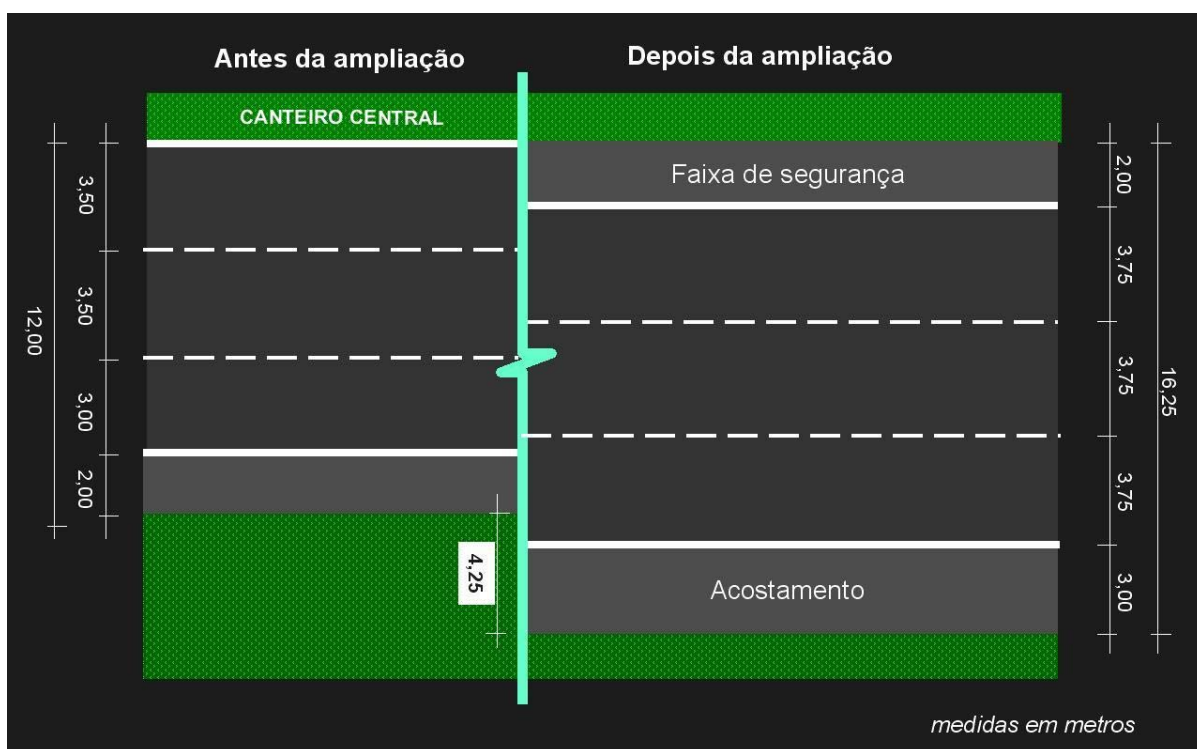


Figura 3.2: Estrutura de Ampliação da rodovia BR-290/RS

## 4 METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar o comportamento de uma estrutura de pavimento típica da região, foi realizado nesta pesquisa ensaios acelerados com o emprego de um Simulador de Tráfego Móvel. Para avaliar o comportamento do pavimento, uma série de medidas acompanhando a evolução da deterioração do pavimento foi realizada no período de ensaio.

Cabe salientar que o equipamento o equipamento Simulador de tráfego foi locado pela Concessionária por um período de três meses. Essa limitação do ensaio orientou em muitas decisões referentes ao programa experimental.

### 4.1 A ESTRUTURA AVALIADA

Por ser uma estrutura com perfil conhecido por completo até às camadas de terraplenagem (sabendo-se as características dos materiais constituintes de todas as camadas) e ser uma estrutura adotada em uma grande extensão da rodovia BR-290/RS e também, com algumas adequações, em outras rodovias da região sul do Brasil, definiu-se que a estrutura de pavimento a ser analisada seria justamente a da ampliação das pistas de rolamento.

Até o momento da pesquisa, a rodovia já estava com a ampliação concluída em toda a pista sentido Osório – Porto Alegre (entre os km 0 e 96) e em parte da pista no sentido Porto Alegre – Osório (entre os km 96 e 70).

A estrutura de ampliação típica adotada na rodovia contempla em 60cm de espessura de areia, 30cm de espessura de material primário pétreo basáltico, 15cm de espessura de base de brita graduada (basalto) e 8cm de espessura de revestimento com CBUQ, conforme Figura 4.1.



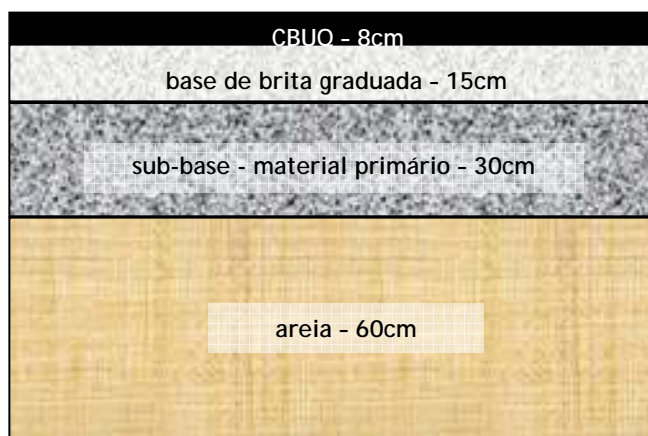


Figura 4.1: Seção esquemática da estrutura do pavimento a ser analisada nesta pesquisa

#### 4.1.1 Definição do local do ensaio

Na definição do local a ser analisado, também seria necessário considerar a limitação do período de ensaio em três meses (período de locação). Assim, havia a necessidade de nesse período ser atingido o objetivo do ensaio, ou seja, seria fundamental para a pesquisa que nesse intervalo de tempo já ocorresse a deterioração significativa do pavimento. Para garantir essa variação nas condições do pavimento (com evolução das trincas, do afundamento de trilha de roda e de demais parâmetros), definiu-se por um local que já houvesse iniciado o processo de deterioração. Desse modo, e também levando-se em consideração questões operacionais e de segurança, o trecho definido para ser ensaiado pelo Simulador de Tráfego foi o localizado no km 5 da rodovia (Figura 4.2), na pista sentido Osório – Porto Alegre, faixa em que há a estrutura da ampliação (3ª faixa). O trecho em análise foi construído no ano de 2004.

O fato de se estar trabalhando em uma estrutura que já sofreu a ação do tráfego possibilita ainda fazer correlações entre a ação ocasionada pelo tráfego real e a simulada pelo equipamento Simulador de Tráfego, permitindo, através de uma série de considerações referentes a carga aplicada e velocidade de tráfego, por exemplo, estimar fatores de correção “simulador-campo”.



Figura 4.2: Vista geral do km 5 da rodovia BR-290/RS, local do ensaio com o Simulador de Tráfego

Após a simulação do primeiro trecho – TRECHO SIMULADO 1 (sobre a pista já solicitada pelo tráfego real), o simulador foi deslocado para o acostamento da rodovia, no mesmo local (Figura 4.3), que seria um trecho com idênticas características, mesma idade, mas sem ter sofrido o tráfego real, e, por conseqüente, sem ter iniciado o processo de deterioração – TRECHO SIMULADO 2.

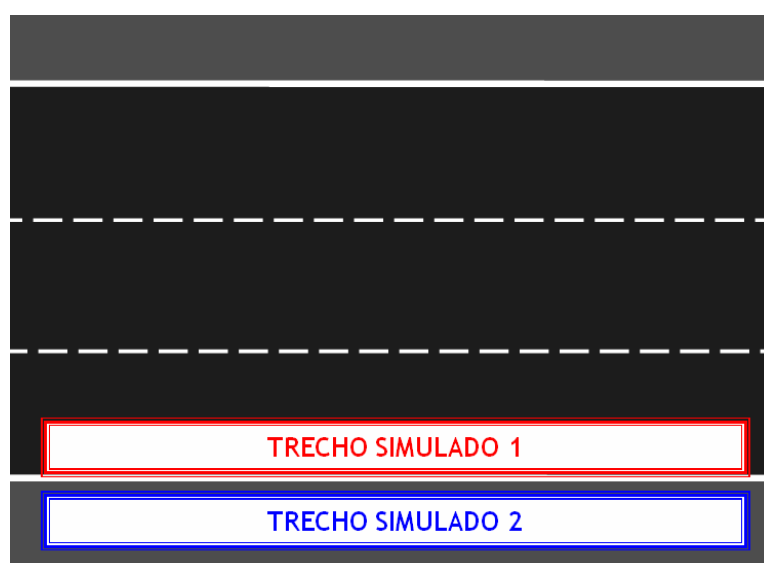


Figura 4.3: Detalhe dos trechos ensaiados

Assim, seria possível acompanhar a evolução completa da deterioração do pavimento, garantindo, através do primeiro ensaio, a degradação final do pavimento, e, com o segundo ensaio, o processo inicial de degradação, conforme exemplificado na Figura 4.4, com o gráfico da evolução da porcentagem de trincamento.

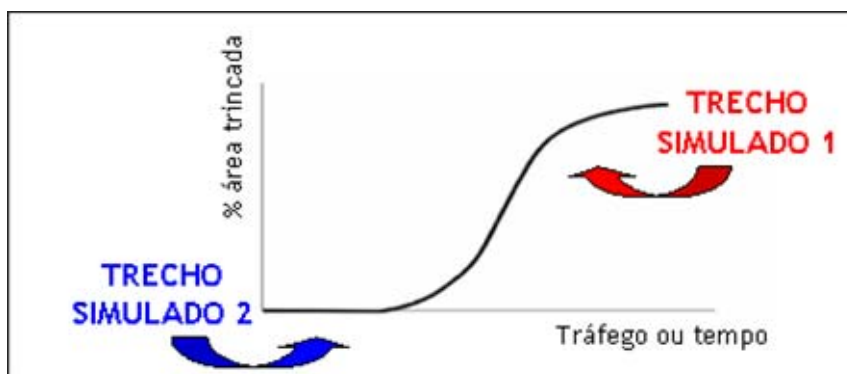


Figura 4.4: Exemplo do processo de degradação a ser atingido com os ensaios no TRECHO SIMULADO 1 e TRECHO SIMULADO 2

Inicialmente, antes de serem ensaiados, os dois trechos simulados possuíam as características apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Condições iniciais dos trechos ensaiados pelo Simulador de Tráfego

Característica	TRECHO SIMULADO 1	TRECHO SIMULADO 2
$N_{AASHTO}$	$10^6$	0
Área trincada [cm/m <sup>2</sup> ]	148	0
DEFLEXÕES [10-2mm] (Viga Benkelman)	42	38
DEFLEXÕES [10-2mm] (Viga Eletrônica)	30	28
ATR [mm]	14	0,9

Após os ensaios acelerados com o Simulador de Tráfego, haveria, no trecho da rodovia ensaiado, quatro condições do pavimento, apresentadas na Figura 4.5. Sobre a faixa já trafegada inicialmente pelo tráfego real, haveria a condição sem a solicitação do Simulador (apenas ciclos de tráfego real) e a condição do pavimento solicitado pelo Simulador de Tráfego (ciclos de tráfego real somados aos ciclos do equipamento). No acostamento também, haveria a condição ensaiada pelo Simulador (ciclos do equipamento) e a condição não ensaiada (não tendo sido solicitada a nenhum ciclo – real ou do Simulador).

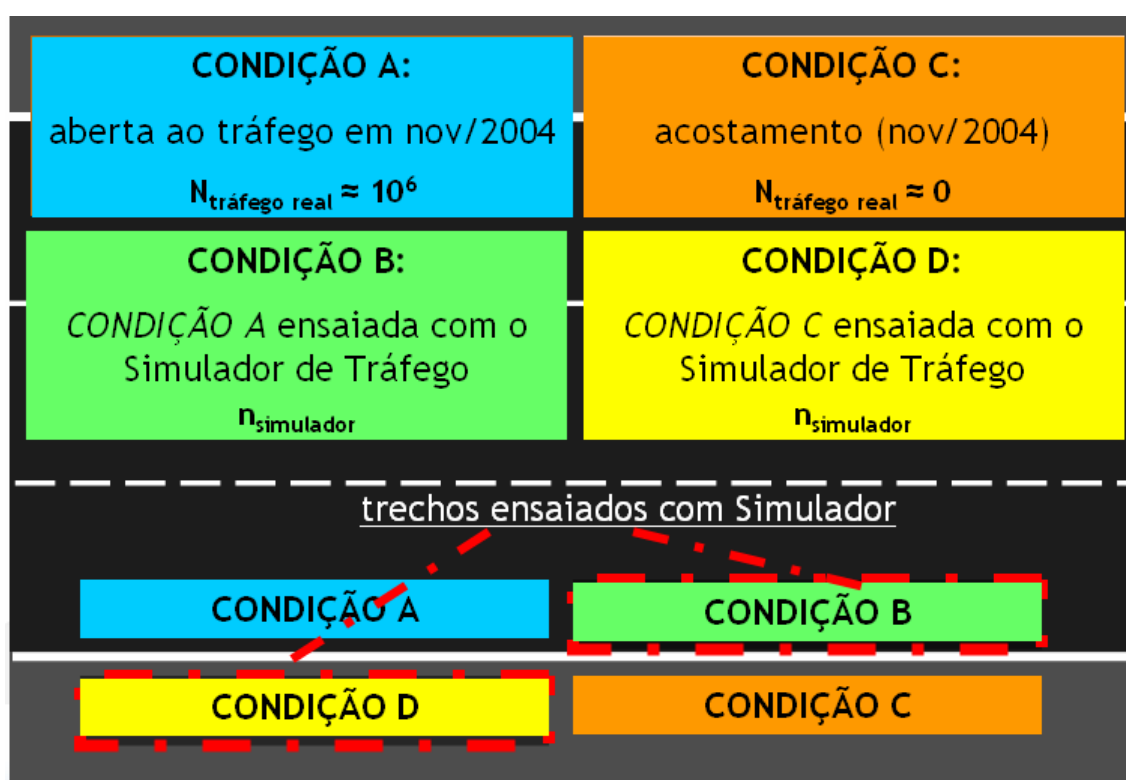


Figura 4.5: Condições do trecho da rodovia após os ensaios acelerados

Tendo, no término da pesquisa, as variadas condições expostas de solicitação do pavimento, é possível avaliar não somente o comportamento da estrutura de pavimento avaliada quando submetida a ensaios acelerados, como compará-los com os resultados do pavimento quando submetido ao tráfego real da rodovia.

## 4.2 O SIMULADOR DE TRÁFEGO MÓVEL

O simulador linear de tráfego do tipo HVS, a ser utilizado nesta pesquisa, foi desenvolvido e construído pela Cifali conforme Figura 4.6, com a colaboração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir da experiência desta com aproximadamente dez anos na operação do Simulador de Tráfego UFRGS/DAER.



Figura 4.6: Simulador de Tráfego tipo HVS empregado na pesquisa

O Simulador de Tráfego Móvel – HVS (Hércules Veículo Simulador) possui as seguintes características na sua configuração:

- ✖ Comprimento total do equipamento 19m
- ✖ Largura total 3m
- ✖ Altura 4,5m
- ✖ Peso de transporte (sem lastro) 32t
- ✖ Peso total com lastro 50t
- ✖ Tanque d'água (3 x 8850 L) 26550 L

- × Velocidade de 7km/h
- × Comprimento de simulação máxima 10m
- × Comprimento de simulação útil 6,0m
- × Largura de simulação máxima de 1m
- × Ciclos (Sentido Único) 350 ciclos p/h
- × Ciclos (Sentidos Opostos) 700 ciclos p/h
- × Carga máxima aplicada (semi - eixo) 8.000 Kgf
- × Pneus 900; 1000; super single
- × Tensão de comando/força 220 V; 380 V
- × Frequência 50 / 60

Sistema de Guiamento do Rodado: O equipamento possui um conjunto de rodado duplo ou simples o qual exerce pressão sobre o pavimento a ser testado de acordo com dados predeterminados. O carro possui rodas laterais que promovem o seu guiamento, sobre trilhos tracionados por um cabo de aço conforme Figura 4.7.



Figura 4.7: Detalhe do guiamento do Simulador de Tráfego

Sistema de Aplicação de Cargas: A aplicação de carga se faz através de uma unidade hidráulica, comandada por um cilindro hidráulico que varia de 15kN até 90kN, com uma velocidade máxima de 9km/h, no semi-eixo o que permite acelerar os esforços associados ao carregamento e simular, efetivamente, as sobrecargas, conforme mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8: Detalhe da unidade hidráulica do Simulador de Tráfego

O sistema se dá com deslocamento em um único sentido (unidirecional) ou nos dois sentidos (sentidos - opostos), conforme determinação do projetista:

- Sentido Único: o carro desloca-se no sentido longitudinal do equipamento havendo contato do pneu com o pavimento somente em um único sentido, o retorno se dá com o rodado suspenso (recomendado para ensaios de fadiga);
- Sentido - Oposto: o carro desloca-se no sentido longitudinal do equipamento havendo contato do pneu com o pavimento tanto na ida quanto na volta (recomendado para estudos de afundamento de trilha de roda).

Nesta pesquisa será realizado o deslocamento em sentido único.



Sistema de Deslocamento Transversal: O deslocamento pode ser feito de duas maneiras:

- Deslocamento Lateral Transversal Estático: é quando o conjunto chega ao fim do curso de um sentido e movimenta-se lateralmente fazendo que este no próximo curso não passe sobre o percurso anterior;
- Deslocamento Lateral Transversal: este movimento é similar ao estático porém o conjunto desloca-se transversalmente durante o trajeto do percurso.

Estes deslocamentos são ajustados no painel de controle do simulador podendo-se regular o tempo de deslocamento conforme necessário (Figura 4.9).



Figura 4.9: Detalhe do elemento responsável pelo deslocamento transversal do Simulador de Tráfego

Sistema de Amortecimento: O sistema de amortecimento é um dispositivo de segurança composto por molas helicoidais fixadas nas extremidades dos trilhos de guiamento e sua principal função é a parada do carro com segurança prevenindo uma falha no sistema de controle (Figura 4.10).





Figura 4.10: Detalhe do elemento de amortecimento do Simulador de Tráfego

Sistema de Acionamento: O sistema é acionado por um motor de indução tipo gaiola, de 60HP, 1770RPM e pode operar tanto com 220/380/440V. O sistema de acionamento é comandado pelo sistema de controle que através de sensores indutivos instalados ao longo do trilho do carro transmite um sinal à contactora e a mesma transmite um sinal ao sistema de acionamento gerando a desaceleração /aceleração do carro (Figura 4.11 e Figura 4.12).



Figura 4.11: Detalhe do sistema de acionamento do Simulador de Tráfego



Figura 4.12: Detalhe dos sensores indutivos do Simulador de Tráfego

Sistema de Rodado: O sistema de rodado do carro se dá por um garfo articulado que possui um semi-eixo de caminhão na extremidade. São utilizados rodados comerciais de caminhões, conforme mostra a Figura 4.13.



Figura 4.13: Detalhe do sistema de rodado do Simulador de Tráfego

Sistema de Controle: O sistema de controle é composto por um quadro de comando elétrico e de um microprocessador programável acoplado, que aciona todos os sistemas integrantes do simulador de tráfego, conforme mostrado na Figura 4.14. O sistema de controle está localizado na parte traseira do equipamento Simulador de Tráfego.



Figura 4.14: Detalhe do painel de controle do Simulador de Tráfego, localizado na cabine traseira do equipamento

Sistema de Aceleração e Desaceleração: O sistema de aceleração e desaceleração de deslocamento do carro é comandado pelo sistema de controle, através do acionamento do freio do motor elétrico, e segundo um sinal elétrico originário de sensores instalados ao longo dos trilhos de guiamento do carro.

Sistema de Emergência: O sistema é composto por duas caixas de segurança instaladas nas laterais do Simulador conforme mostrado na Figura 4.15. Também possui um sistema de emergência no quadro de controle, dentro da cabine.

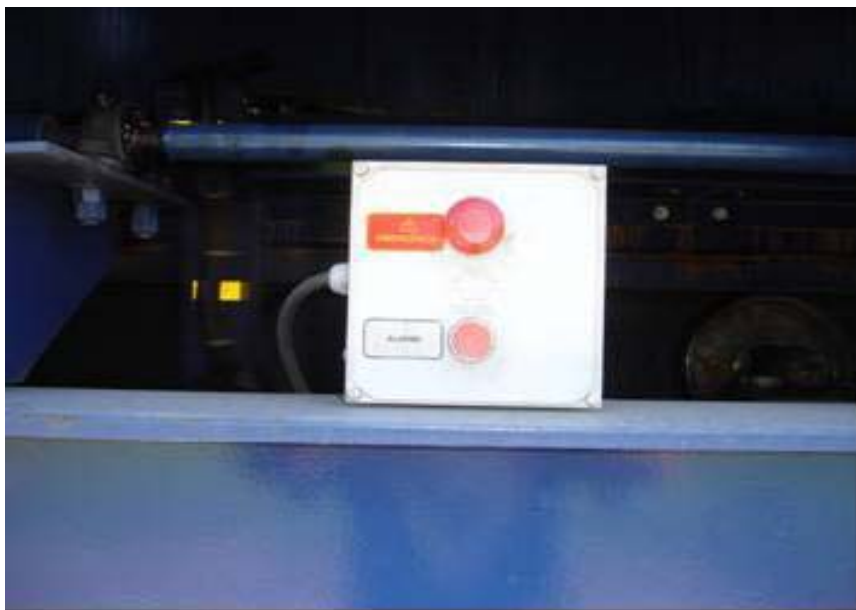


Figura 4.15: Detalhe do sistema de emergência do Simulador de Tráfego

Este equipamento tem fácil mobilidade e pode ser deslocado entre os locais de testes através de um cavalo mecânico, como visto na Figura 4.16.



Figura 4.16: Detalhe do Simulador de Tráfego sendo deslocado



#### **4.2.1 Histórico do Simulador de Tráfego HVS empregado na pesquisa**

O simulador de tráfego HVS fabricado no Brasil tem como principal característica sua mobilidade, podendo se deslocar por rodovias se necessário, para realização de testes e estudos em pistas reais de rodovias, vias urbanas ou pistas de aeroportos, através de reboque, onde é operado hidráulicamente e os carregamentos podem ser aplicados com rodas simples ou dupla. Esta característica é única, em simuladores de tráfego semelhantes existentes no Brasil e de grande importância, considerando-se as dimensões de nosso país e as distâncias a serem percorridas para se alcançar locais de características distintas.

Permitem também testar diversos tipos de materiais como asfalto modificado com polímeros, borracha, concreto, bases recicladas, etc. Enfim, favorece a escolha e o dimensionamento correto de tecnologias a serem empregada na construção ou recuperação de uma rodovia. Certamente, a disponibilidade deste tipo de equipamento no país, abrirá caminho para grandes avanços no conhecimento do comportamento de pavimentos e será instrumento importante para o estabelecimento de parâmetros para otimização de dimensionamento de pavimentos e utilização de novos materiais ou processos executivos.

O primeiro simulador de tráfego móvel da América Latina foi desenvolvido e patentado pela Cifali no ano de 2002, e hoje pertence à empresa Simular que possui 2 unidades deste. A primeira unidade foi utilizada no início de uma pesquisa do DAER-RS e no estudo realizado na concessionária de rodovias AUTO VIAS em São Paulo no ano de 2004. A segunda unidade foi utilizada na etapa final dos estudos realizados pelo DAER-RS.

O estudo realizado em parceria entre o DAER-RS, Simular, Brasília Guaíba Obras Públicas e Greca Asfaltos na RS 122 teve início em agosto de 2003, com dois segmentos experimentais contíguos de 300 metros de extensão, sendo um com revestimento de concreto asfáltico convencional e o outro modificado com borracha. O objetivo dos testes é comparar, através da simulação acelerada em escala real, o

comportamento destes dois diferentes tipos de ligantes, apontando a melhor e mais econômica solução para esta aplicação específica.

A RS/122 é a principal rodovia estadual de ligação entre a região metropolitana de Porto Alegre e o Vale do Sapateiro com o Pólo Metal - mecânico de Caxias do Sul. O tráfego é intenso, com uma média de 15 mil veículos por dia, sendo 35% deste total de veículos comerciais. Atualmente está sendo duplicada e restaurada (DAER-RS, 2004).

Foram realizados os testes com o simulador de tráfego móvel do tipo HVS, que permitiu à equipe de técnicos responsáveis pela pesquisa obter conclusões importantes sobre o desempenho funcional do pavimento testado. Dentre as conclusões feitas pelo DAER-RS (2004), está que CBUQ convencional apresentou um excelente desempenho, e a estrutura do pavimento existente está muito bem consolidada o que permitiu realizar testes acelerados avaliando especificamente o revestimento. Após aplicação de  $1,2 \times 10^6$  ciclos de carga, com variação de cargas entre 4,1tf a 9,1tf no semi – eixo chegou-se à conclusão que equivaleria a um N de  $5 \times 10^7$  passagens do eixo padrão. Os resultados do asfalto borracha até o momento não foram divulgados.

O trabalho realizado com o HVS na Via Anhanguera, no Estado de São Paulo, localizado na Rodovia SP-330 sentido São Paulo – Ribeirão Preto, de responsabilidade da Concessionária Autovias, teve quatro seções teste construídas. De acordo com o relatório da Autovias, o pavimento original é constituído por revestimento asfáltico com 15cm de espessura, base de solo cimento com 20cm de espessura, uma sub – base com solo estabilizado granulometricamente com 20cm de espessura e o subleito composto por material silto – argiloso (AUTO VIAS, 2004).

As seções de reabilitação foram construídas no ano de 2003 isoladamente ou pela associação das seguintes camadas:

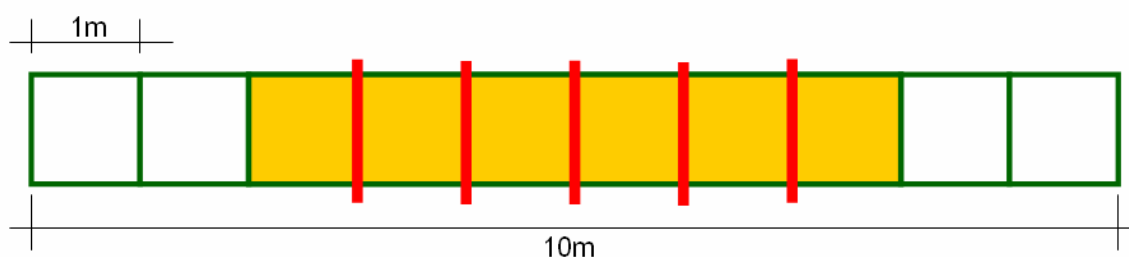
- Tratamento Superficial Duplo com Polímero;
- Tratamento Superficial Duplo e Micro Revestimento a Frio com Polímero;

- Tratamento Superficial Simples e Micro Revestimento a Frio com Polímero;
- Tratamento Superficial Simples.

A pesquisa com Simulador de Tráfego permitiu à AUTO VIAS (2004) concluir que a solução de reabilitação dos pavimentos da Via Anhanguera com o Tratamento Superficial Simples seguida de Micro Revestimento a Frio com Polímero é adequada para o tráfego futuro do local.

### 4.3 PARÂMETROS DE ANÁLISE

Para medidas da variação dos parâmetros de desempenho dos trechos ensaiados, dividiu-se o segmento ensaiado em 10 segmentos de 1m de extensão cada. Para a avaliação, foram excluídos os dois segmentos iniciais e os dois segmentos finais, locais de aceleração e desaceleração do equipamento Simulador de Tráfego. Assim, as medidas dos parâmetros do comportamento do pavimento foram realizadas em cinco seções transversais do trecho.



#### 4.3.1 Parâmetros estruturais

O acompanhamento das respostas estruturais do pavimento realizou-se através de medições semanais de deflexão em cinco seções transversais do pavimento.

##### 4.3.1.1 Medidas Deflectométricas

A resposta estrutural do pavimento foi monitorada através de medições deflectométricas, realizadas com a viga Benkelman e viga eletrônica (Figura 4.17) sendo possível o acompanhamento das deflexões do pavimento com a evolução do número de passadas do trem de cargas do simulador, além do acompanhamento em cada seção.



Figura 4.17: Viga Benkelman e Viga Eletrônica no Simulador de Tráfego na rodovia BR-290/RS

Os resultados das medidas deflectométricas são obtidos através da média de 3 leituras em cada seção. Para cada medida de deflexão, media-se a temperatura do revestimento na superfície.

Fez-se a correção das medidas de deflexão por meio de um gráfico apresentado no Guia da AASHTO de 1993 (Figura 4.18), o qual fornece coeficientes que transformam a deflexão medida para deflexões a temperatura de 20°C. Esse estudo envolveu uma série de espessuras de revestimentos asfálticos, com dados de deflexão obtidos na faixa de temperatura da superfície do pavimento entre 0°C e 50°C.



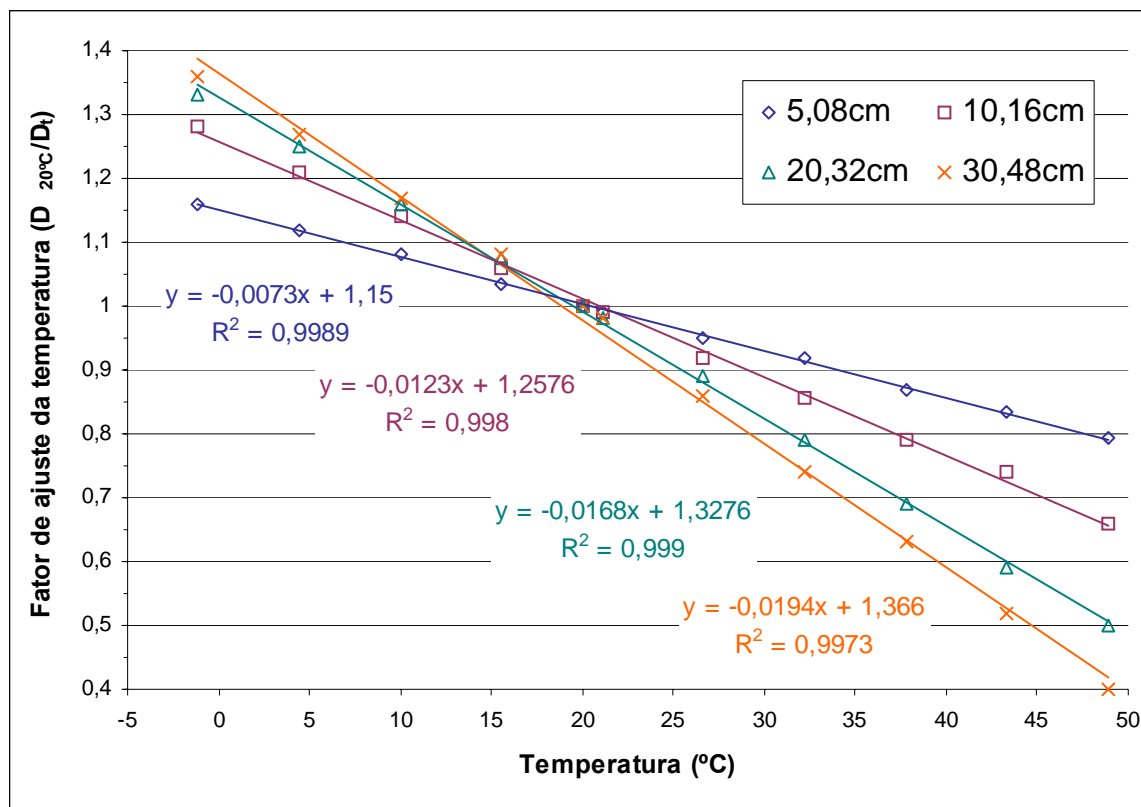


Figura 4.18: fatores de correção da temperatura para medidas de deflexão em pavimentos de concreto asfáltico (modificado da AASHTO, 1993)

### 4.3.2 Parâmetros de comportamento

#### 4.3.2.1 Marcação de trincas

A análise da evolução de trincas foi feita pela inspeção visual realizada semanalmente e, para facilitar a visualização do surgimento e evolução do trincamento, as trincas foram pintadas com tinta (Figura 4.19), sendo que cada cor representa um número de ciclos de carga aplicados pelo Simulador, seguindo a seguinte sequência de cores: branca, amarela, vermelha, azul e verde.

A cada inspeção, as trincas foram desenhadas em papel milimetrado, com o auxílio de uma grade metálica de 1,0 x 1,0m (Figura 4.20), subdividida em quadrados de

10cm de lado, colocada sobre o revestimento trincado, facilitando a transposição dos levantamentos.



Figura 4.19: Marcação das trincas nos trechos ensaiados pelo Simulador de Tráfego



Figura 4.20: Controle da evolução do trincamento

#### 4.3.2.2 Deformações Permanentes

Acompanhou-se a evolução das deformações permanentes com uma treliça metálica (Figura 4.21 e Figura 4.22), que permitiu determinar o afundamento de trilha de roda.



Figura 4.21: Medida do afundamento de trilha de roda com a treliça metálica

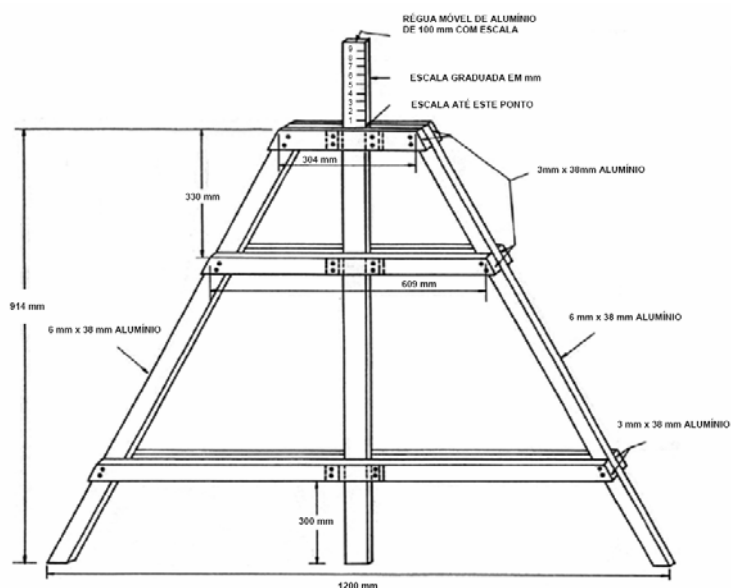


Figura 4.22: Treliça de alumínio para medição do afundamento de trilha de roda

### 4.3.3 Parâmetros da textura do pavimento

As medidas de textura da superfície dos revestimentos foram obtidas pela realização dos seguintes ensaios:

- × Pêndulo Britânico;
- × Mancha de Areia;

#### 4.3.3.1 Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico, mostrado na Figura 4.24, é constituído de uma estrutura metálica, na qual uma haste acoplada realiza um movimento pendular. Na ponta desta haste está fixada uma sapata de borracha que, ao ser liberado o movimento, ela toca o pavimento. Através da diferença de altura entre o início e o final do movimento, tem-se uma medida indireta de microtextura superficial, podendo-se avaliar a perda de resistência á derrapagem em função do tráfego. Este ensaio é normatizado pela ASTM E303-93 e os resultados são dados em BPN (Britch Number Pendulum).



Figura 4.24: Pêndulo Britânico



#### 4.3.3.2 Mancha de Areia

Este ensaio, normatizado pela ASTM E 965 – 96, consiste do espalhamento de micro-esferas de vidro na superfície do pavimento, semelhante a uma areia fina, com volume, peso e densidade conhecidos, como mostra a Figura 4.25. Este espalhamento é realizado com um bastão padronizado, até o preenchimento total das rugosidades do revestimento, em formato circular, donde mede-se o diâmetro. Com essa medida e, conhecendo-se o volume de material, obtém-se a altura da mancha, proporcionando uma medida de macrotextura da superfície.



Figura 4.25: Ensaio de “Mancha de Areia”

#### 4.3.4 Parâmetros ambientais

Realiza-se o monitoramento das precipitações pluviométricas e das temperaturas médias do ar durante o período de ensaios. As informações a respeito das precipitações pluviométricas foram obtidas através de dados meteorológicos da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul e de medida no local do ensaio, através

de um pluviômetro (Figura 4.26). Já as informações de temperatura do ar, foram obtidas através de medições horárias junto ao Simulador.



Figura 4.26: Pluviômetro instalado junto ao Simulador de Tráfego

### 4.3.5 Retiradas de amostras em campo

#### 4.3.5.1 Amostras do Revestimento Asfáltico

No intuito de analisar o comportamento do revestimento asfáltico, foram retiradas corpos-de-prova ao longo do trecho ensaiado, para avaliar o teor de ligante, a densidade, o grau de compactação, o módulo de resiliência, a resistência à tração e a espessura da camada asfáltica (Figura 4.27). Tais amostras foram retiradas no intuito de avaliar as quatro condições finais do pavimento após ensaiados com o Simulador de Tráfego, seguindo esquema apresentado na Figura 4.28.



Figura 4.27: Extração de corpos-de-prova no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego

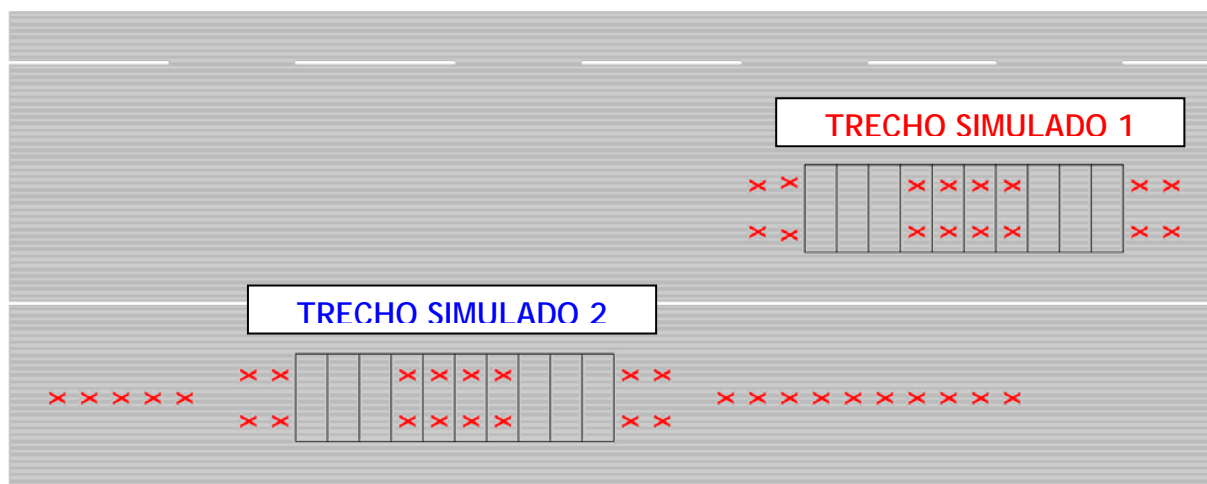


Figura 4.28: Esquema da extração de corpos-de-prova no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego

#### 4.3.5.2 Amostras nos Materiais Granulares

Foram também realizadas aberturas de poços de inspeção no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego, com o objetivo de obter as espessuras das camadas granulares e coesivas, no intuito de realizar ensaios de densidade, umidade, CBR,



expansão, granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e módulo de resiliência (Figura 4.29 e Figura 4.30).



Figura 4.29: Abertura de poços de inspeção no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego

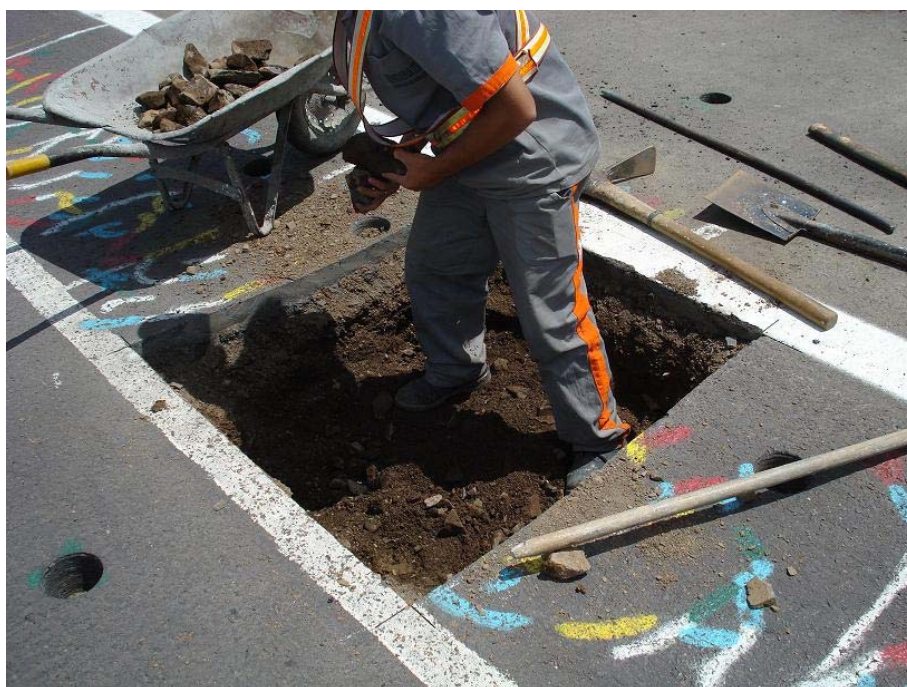


Figura 4.30: Abertura de poços de inspeção no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego



## 5 RESULTADOS

Durante o período de operação do Simulador de Tráfego, foi monitorada a evolução da degradação do pavimento com a atuação do trem de cargas do equipamento.

### 5.1 DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS

O deslocamento longitudinal do rodado do simulador é acompanhado por um deslocamento gradativo, no sentido transversal, para evitar a atuação da carga dinâmica num mesmo eixo longitudinal e a formação de uma trilha de roda canalizada, aproximando-se, assim, às condições reais de tráfego de rodovias. Ao longo dos percursos do rodado, estabeleceu-se a formação de uma trilha de roda de 70 cm para o estudo das estruturas da rodovia BR-290/RS.

A distribuição transversal de cargas, mostrada na Figura 5.1, relaciona pontos na trilha de roda, segundo um eixo transversal de atuação, com a porcentagem de solicitações nesses pontos.

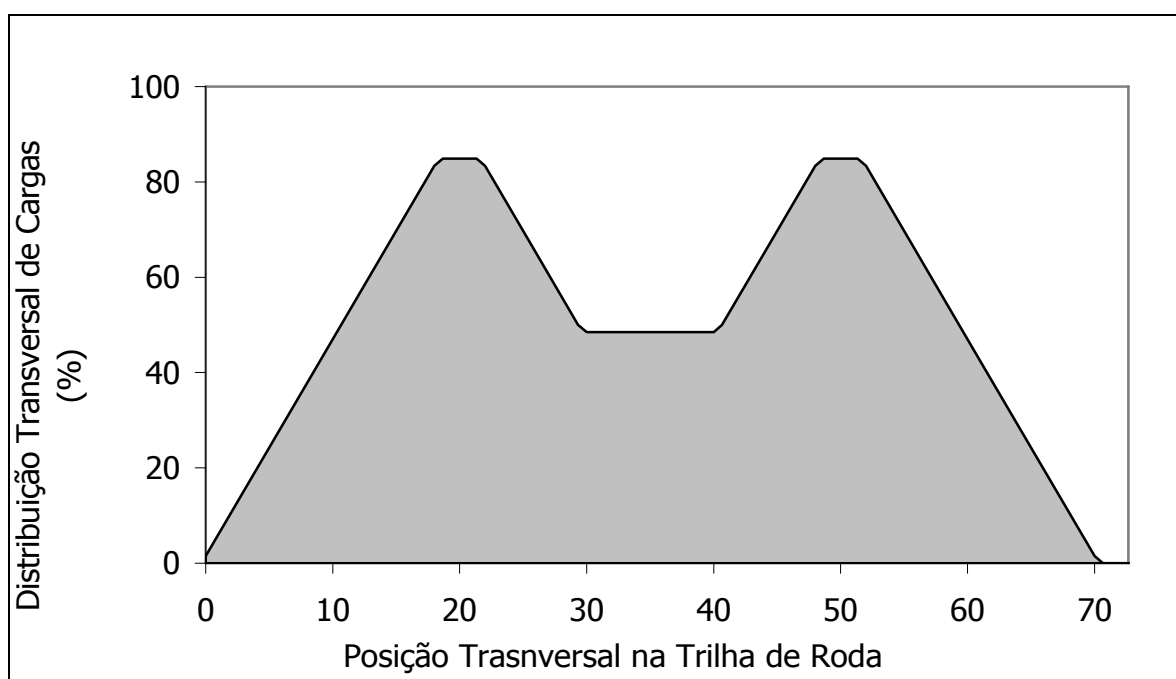


Figura 5.1: Distribuição transversal de cargas

## 5.2 "TRECHO SIMULADO 1"

O primeiro trecho a ser ensaiado referia-se ao segmento de pista já trafegado desde 2004 pelo tráfego real da rodovia, possuindo, antes do ensaio, as condições apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Condições iniciais do "TRECHO SIMULADO 1" ensaiado pelo Simulador de Tráfego

<b>Característica</b>	<b>TRECHO SIMULADO 1</b>
<b>N<sub>AASHTO</sub></b>	10 <sup>6</sup>
<b>Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]</b>	148
<b>DEFLEXÕES [10-2mm] (Viga Benkelman)</b>	42
<b>DEFLEXÕES [10-2mm] (Viga Eletrônica)</b>	30
<b>ATR [mm]</b>	14

### 5.2.1 Histórico de Carregamento

A primeira etapa da fase experimental ocorreu entre os meses de maio e julho de 2007. Ao longo do mês de junho, no entanto, o equipamento apresentou uma série de problemas elétricos e mecânico, permanecendo muitos dias sem funcionamento. Ao final dos ensaios o Simulador de Tráfego havia solicitado o pavimento 170 mil ciclos, com carga de semi-eixo de 8tonf (carga de eixo de 16tonf) e inflação de pneus de 100psi. O equipamento, nesta primeira etapa, ficou em funcionamento 725 horas (30 dias).

Ao todo, foram realizados 5 levantamentos. Exceto entre o primeiro levantamento e o segundo, período em que o equipamento permaneceu paralisado por problemas

elétricos e mecânicos, realizou-se um levantamento a cada semana de ensaio, ocorrendo variabilidades no intervalo de tempo do equipamento funcionando devido a períodos de manutenção do mesmo. A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos levantamentos do primeiro ensaio.

Tabela 5.2: Resumo dos levantamentos do "TRECHO SIMULADO 1"

	<b>data</b>	<b>nº de ciclos</b>	<b>horas trabalhadas</b>
<b>1º levantamento</b>	28/maio	0	0
<b>2º levantamento</b>	05/julho	66.000	319
<b>3º levantamento</b>	12/julho	100.000	434
<b>4º levantamento</b>	17/julho	123.000	509
<b>5º levantamento</b>	26/julho	170.000	725

### 5.2.2 Parâmetros estruturais

A medida da deflexão é uma maneira bastante utilizada para a avaliação estrutural de um pavimento, fornecendo um indicativo da elasticidade da estrutura. A atuação de uma carga dinâmica impõe um estado tensões, gerando deformações de caráter transitório, em todas as camadas.

A evolução das deflexões máximas do pavimento flexível foram obtidas com a Viga Benkelman e a Viga Eletrônica, sendo os resultados apresentados na Figura 5.2 e Figura 5.3, respectivamente.

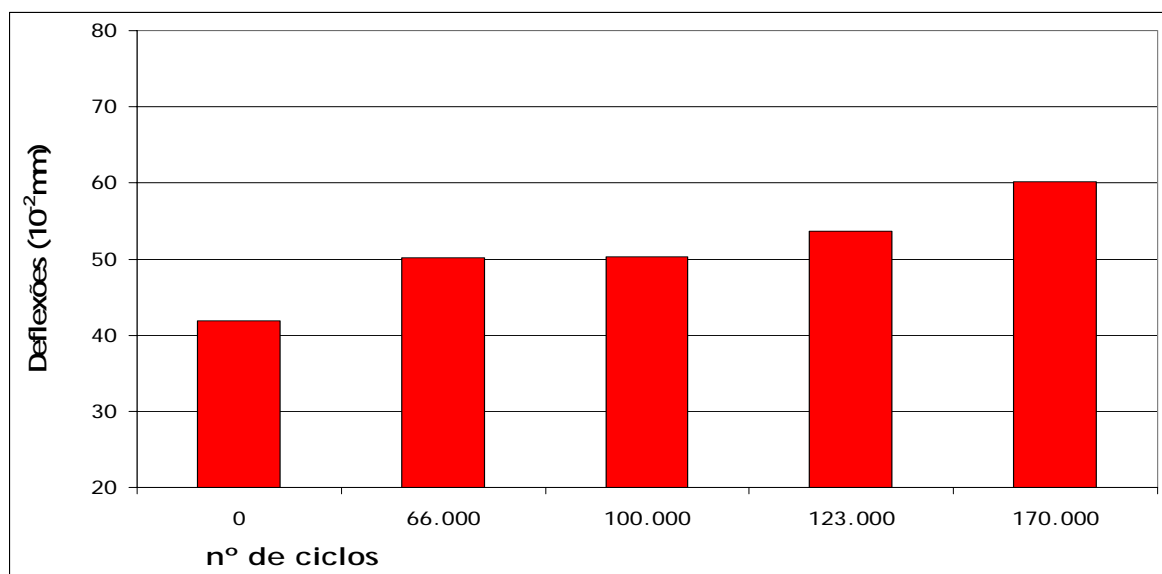


Figura 5.2: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman do "TRECHO SIMULADO 1"

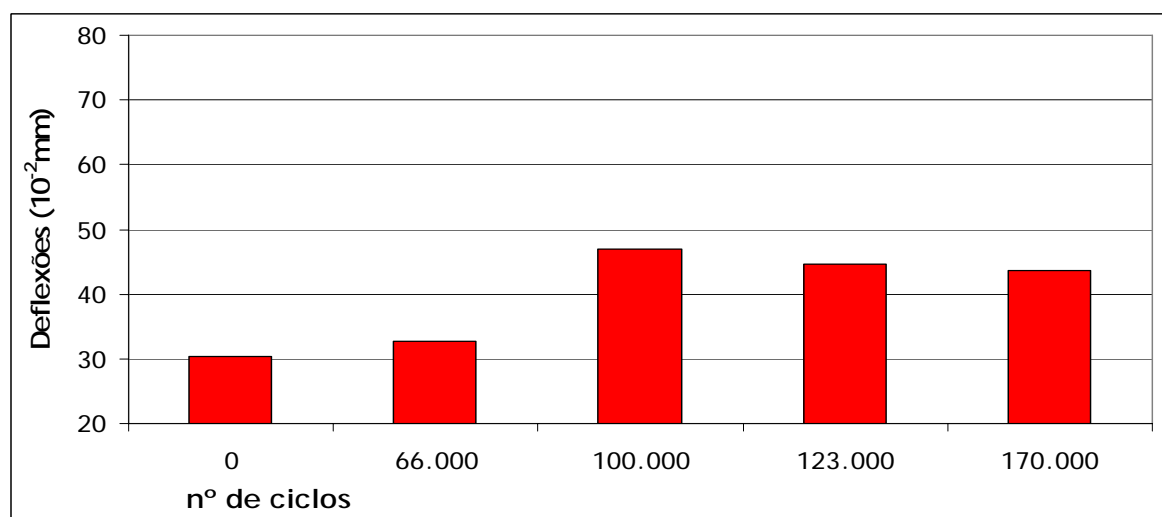


Figura 5.3: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Eletrônica do "TRECHO SIMULADO 1"

Em ambos os resultados, verifica-se uma tendência de crescimento das deflexões do pavimento quando submetido ao número de ciclos do Simulador de Tráfego.

Com a Viga Eletrônica também foi possível verificar a distribuição das deflexões do pavimento com a determinação da bacia de deslocamento. A Figura 5.4 apresenta a evolução também das bacias de deslocamento com o aumento do número de ciclos exercidos sobre o pavimento.

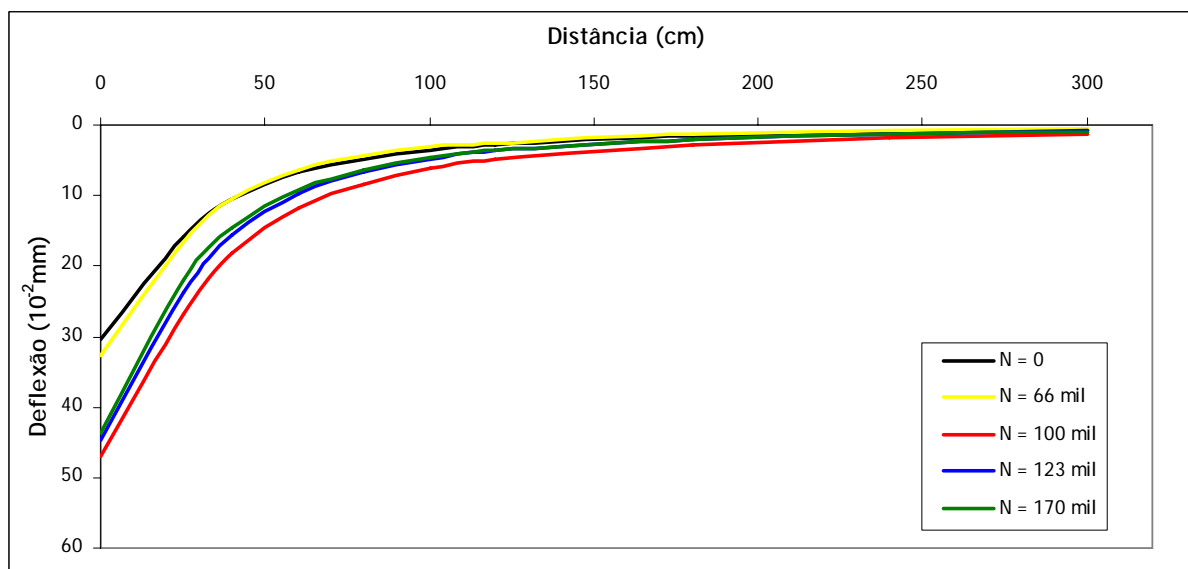


Figura 5.4: Evolução das bacias de deflexões obtidas com a Viga Eletrônica do "TRECHO SIMULADO 1"

Verifica-se, a partir dos resultados das bacias de deflexões, uma acréscimo elevado entre o 2º e 3º levantamento, permanecendo, após, com níveis deflectométricos e com formato de curva de deslocamentos semelhantes. As pequenas variações entre os três últimos levantamentos podem ser consideradas desprezíveis até mesmo pela falta de precisismo dos equipamentos e pelas várias fatores que influenciam as medidas de deflexões, tais como temperatura do pavimento e umidade das camadas inferiores. Para diminuir as variabilidades em função das temperaturas, adotou-se a correção proposta pela AASHTO. No entanto, é de ciência de todos que tais equações foram estimadas a partir de condições bastante diferentes das utilizadas nesta pesquisa, uma vez que foi desenvolvida para pavimentos dos Estados Unidos, com outras estruturas de pavimento, bem como condições climáticas diferentes das encontradas no Brasil, especificamente, para esta pesquisa, na região Sul do Brasil.

### 5.2.3 Parâmetros de comportamento

#### 5.2.3.1 Marcação de trincas

A tentativa de se encontrar as causas prováveis do surgimento de trincas pode ser feita pelas inspeções realizadas em campo, através da visualização das fissuras, ou pela tentativa de uma análise, onde se possam incluir fatores como estrutura do pavimento, tráfego, clima e condições de superfície.

Foram realizadas as marcações das trincas do pavimento a fim de avaliar a taxa de crescimento e de propagação de tais trincas. As marcações foram realizadas com tinta spray. Na marcação adotou-se o critério das cores para identificar as trincas surgidas em cada uma das etapas do ensaio, seguindo a convenção apresentada na Tabela 5.3. O primeiro levantamento representa a condição inicial do trecho ensaiado. Assim, as trincas marcadas com a cor branca referem-se às trincas já existentes no pavimento no início dos ensaios acelerados.

Tabela 5.3: Convenção de cores da marcação das trincas no pavimento

	<b>data</b>	<b>cor da tinta de marcação das trincas</b>
<b>1º levantamento</b>	28/maio	branca
<b>2º levantamento</b>	05/julho	amarela
<b>3º levantamento</b>	12/julho	vermelha
<b>4º levantamento</b>	17/julho	azul
<b>5º levantamento</b>	26/julho	verde

Para acompanhamento da evolução das trincas, também se realizou os desenhos das mesmas. Para tanto, com o auxílio de um gabarito quadriculado, passou-se as trincas reais para um papel milimetrado e, após, para o computador. Os resultados da evolução de trincamento para o "TRECHO SIMULADO 1" estão apresentados na Figura 5.5.

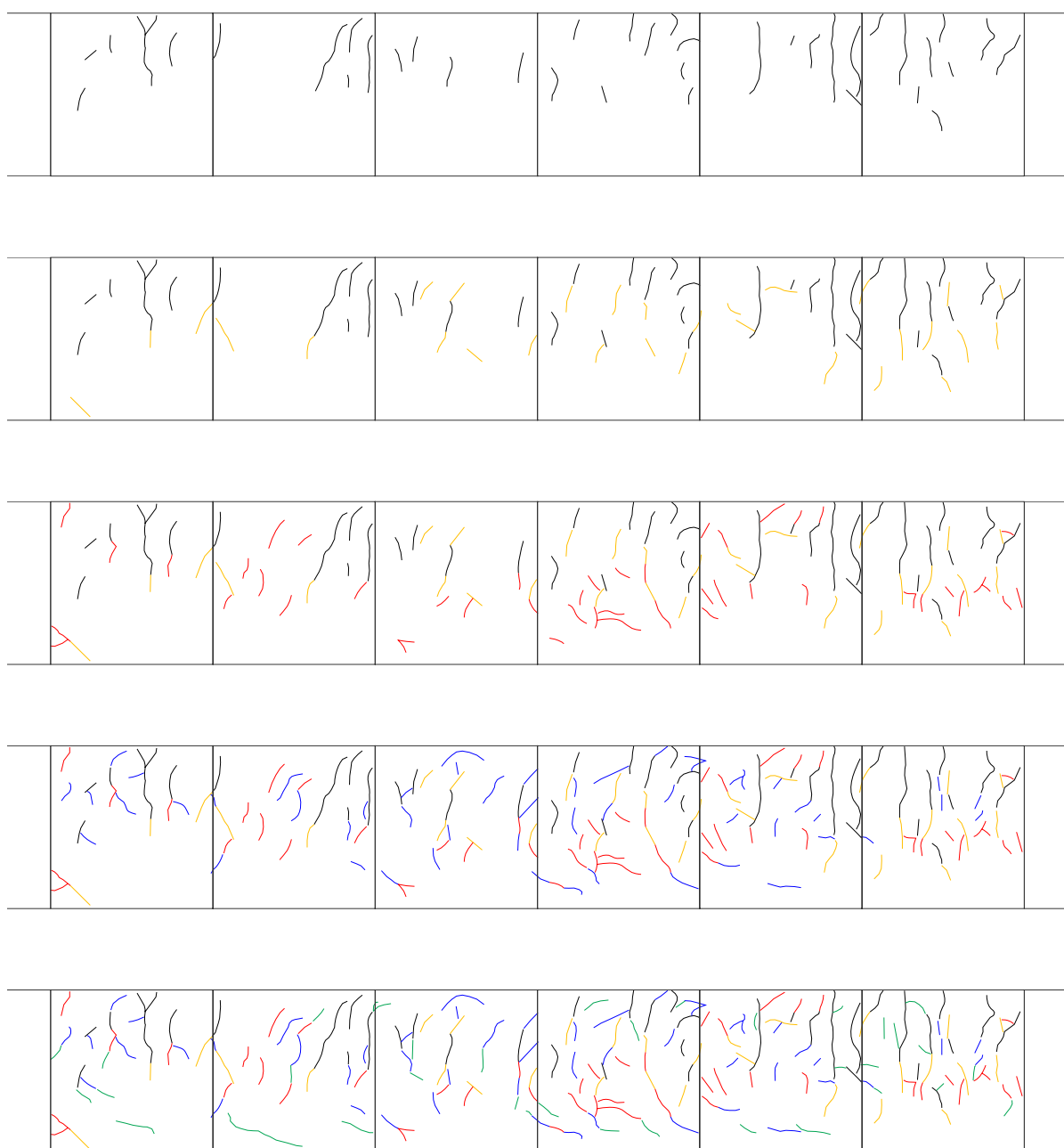


Figura 5.5: Evolução das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 1"

Observa-se que inicialmente as trincas são transversais apenas e não interligadas. Com a evolução dos ensaios, a maioria das trincas passam a se estender em comprimento. Outras surgem, a princípio sem ligação com as já existentes, mas a maioria se origina das trincas que já haviam no trecho. A partir do quarto levantamento pode-se assumir que a maioria das trincas já estão interligadas.

A Figura 5.6, por sua vez, apresenta a foto com a condição final de trincamentos do primeiro trecho ensaiado.



Figura 5.6: Foto da marcação das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 1"



Para quantificar a evolução das trincas realizou-se as medidas do comprimento das mesmas. Desse modo, somando as extensões de todas as trincas, estabeleceu-se a taxa de evolução das trincas do pavimento, apresentada na Figura 5.7. A avaliação do trincamento foi feita através do Método da Gravidade, que consiste em uma medida de comprimento das trincas por área trafegada. Na contagem do comprimento das trincas, considerou-se toda a abertura verificada na camada de recapeamento, independentemente de sua severidade, por considerar subjetivo este tipo de avaliação, sem equipamentos específicos.

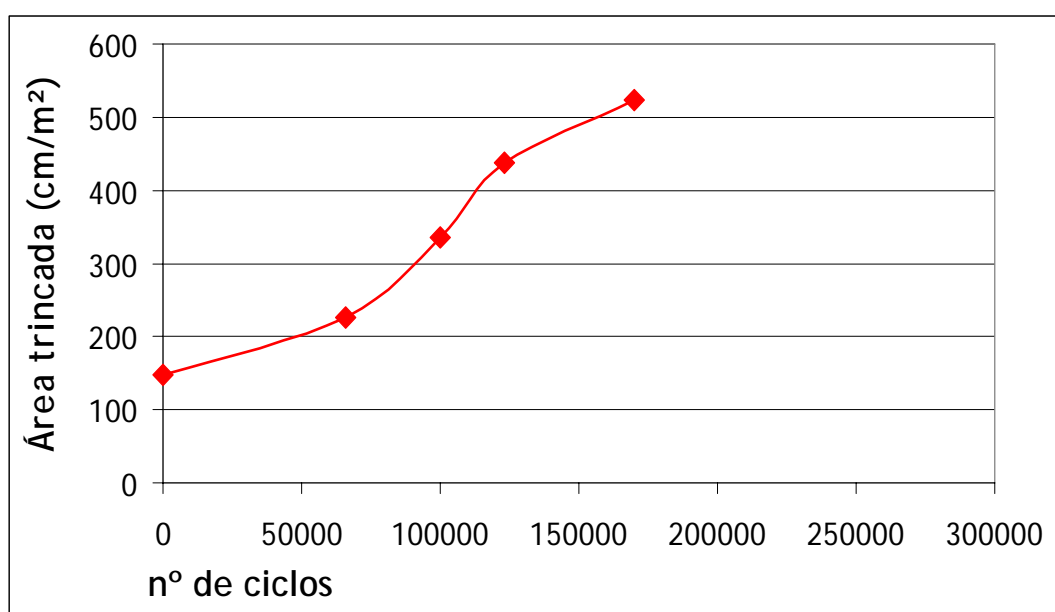


Figura 5.7: Taxa da evolução das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 1"

### 5.2.3.2 Deformações Permanentes

Os afundamentos de trilha de roda, percebidos na superfície do revestimento, são decorrentes das deformações plásticas e das consolidações que ocorrem na estrutura de todas as camadas do pavimento e subleito. No caso da estrutura recapeada em tratamento superficial, a fase de consolidação da camada de subleito já tinha se estabelecido durante o carregamento dinâmico efetuado no estudo de Gonçalves (2002).

A Figura 5.8 fornece os dados da evolução das deformações permanentes média em cada levantamento, acompanhando a evolução em função do número de ciclos do Simulador. Salienta-se que, nesse trecho, o afundamento inicial já era consideravelmente elevado.

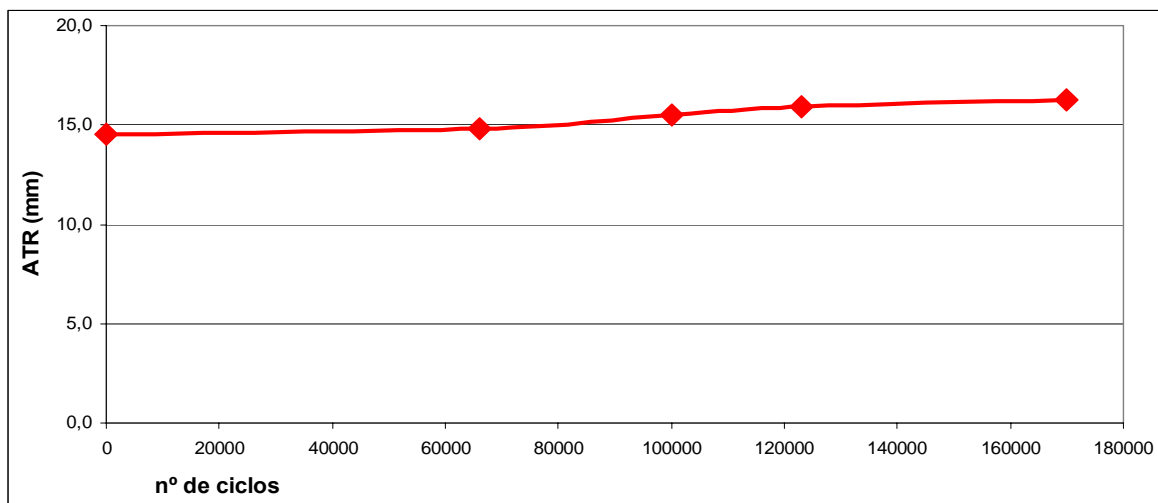


Figura 5.8: Evolução do afundamento de trilha de roda do pavimento do "TRECHO SIMULADO 1"

#### 5.2.4 Parâmetros da textura do pavimento

Adicionalmente, fez-se neste trabalho, a avaliação da perda de textura superficial do pavimento com a evolução do tráfego. A textura da superfície do pavimento pode ser classificada pelo comprimento e amplitude das ondulações observadas no revestimento.

Para esta pesquisa no entanto, tanto os resultados obtidos com o Pêndulo Britânico como os obtidos com o ensaio de "Mancha de Areia" não foram representativos, apresentando variabilidades e inconsistência nos resultados, definindo-se, portanto, em não apresentá-los, visto que não auxiliariam na análise do comportamento do pavimento.

## 5.2.5 Parâmetros ambientais

### 5.2.5.1 Temperatura do ambiente

As medidas de temperatura obtidas diariamente junto ao Simulador durante os ensaios do "TRECHO SIMULADO 1" são apresentadas na Figura 5.9. A temperatura mínima, média e máxima do período de ensaios foi, respectivamente, 7, 14 e 18 °C.

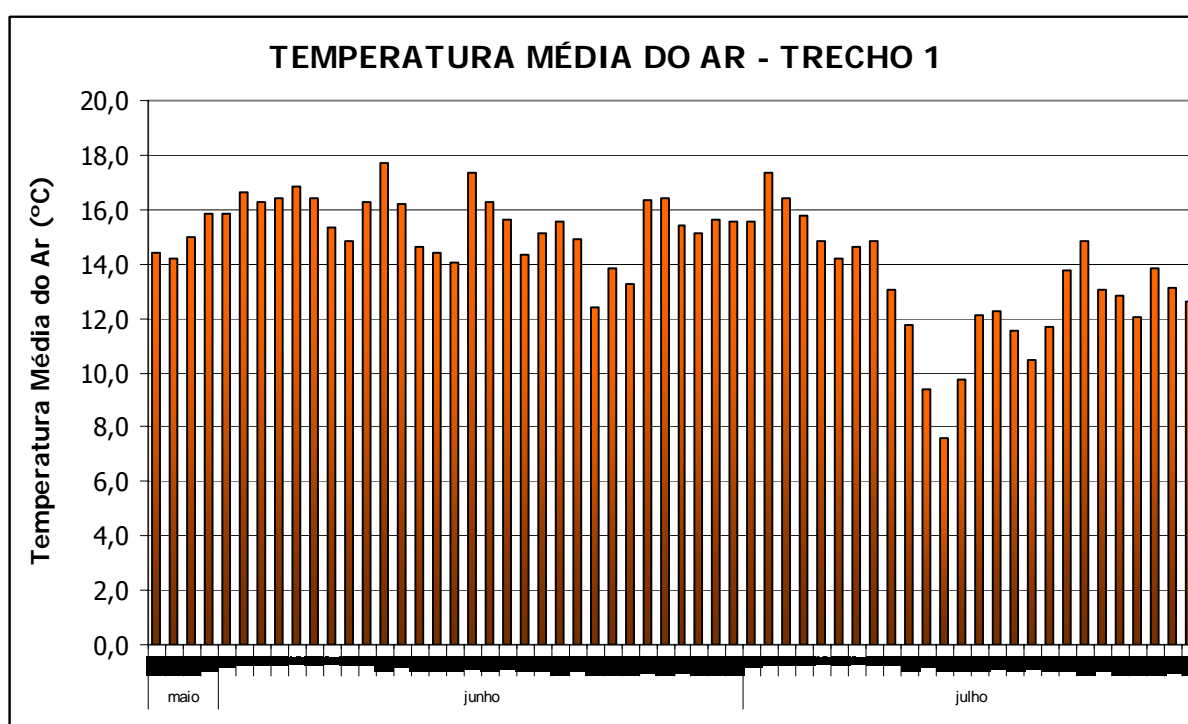


Figura 5.9: Temperatura média do ar durante o período de ensaios do "TRECHO SIMULADO 1"

### 5.2.5.2 Precipitação pluviométrica

As medidas de precipitação pluviométrica obtidas diariamente junto ao Simulador durante os ensaios do "TRECHO SIMULADO 1" são apresentadas na Figura 5.10. No total, durante o ensaio, ocorreu a precipitação de 230mm.

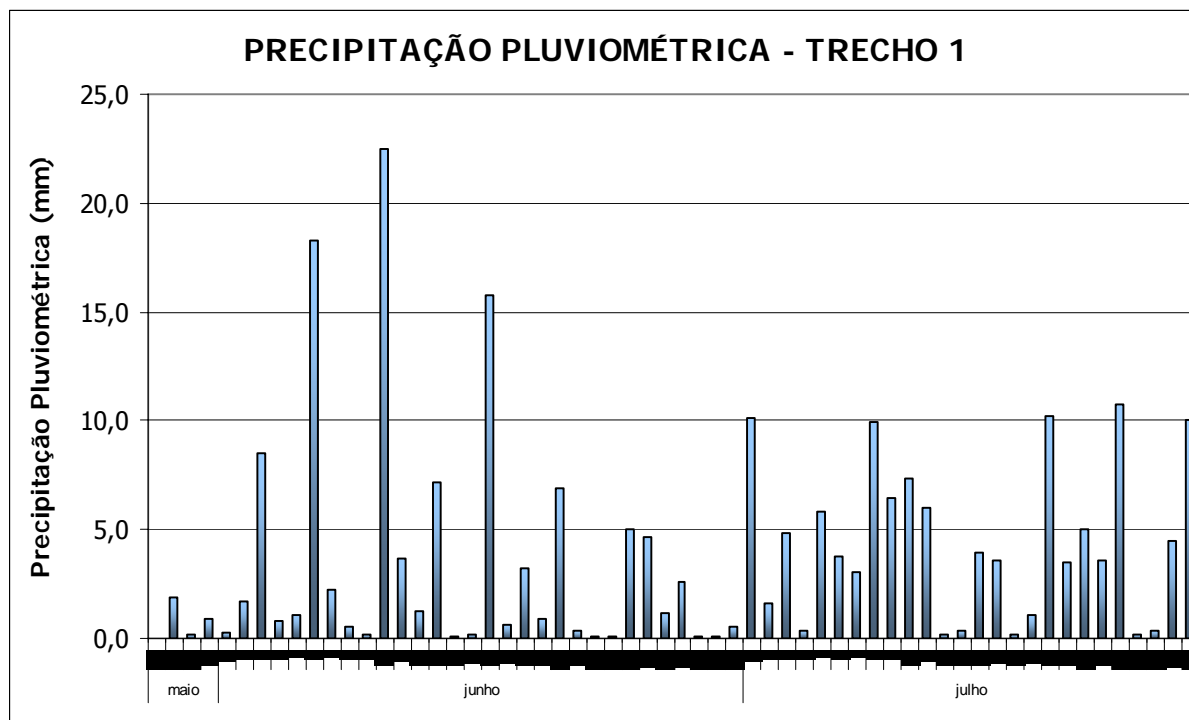


Figura 5.10: Temperatura média do ar durante o período de ensaios do "TRECHO SIMULADO 1"

### 5.2.6 Retiradas de amostras em campo

Embora a extração de corpos-de-prova de misturas asfálticas e de materiais granulares esteja incluída nesse trabalho, os resultados dos ensaios realizados com esses materiais, bem como a análise, fazem escopo de trabalhos futuros decorrentes deste.

### 5.3 “TRECHO SIMULADO 2”

O segundo trecho a ser ensaiado referia-se ao segmento do acostamento, com a mesma estrutura da pista do primeiro trecho, apenas sem ter sofrido o tráfego de veículos, possuindo, antes do ensaio, as condições apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Condições iniciais do “TRECHO SIMULADO 2” ensaiado pelo Simulador de Tráfego

<b>Característica</b>	<b>TRECHO SIMULADO 2</b>
<b>N<sub>AASHTO</sub></b>	0
<b>Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]</b>	0
<b>DEFLEXÕES [10-2mm]</b> <b>(Viga Benkelman)</b>	38
<b>DEFLEXÕES [10-2mm]</b> <b>(Viga Eletrônica)</b>	28
<b>ATR [mm]</b>	0,9

#### 5.3.1 Histórico de Carregamento

A segunda etapa da fase experimental ocorreu entre os meses de agosto e outubro de 2007. Ao final dos ensaios o Simulador de Tráfego havia solicitado o pavimento 255 mil ciclos, com a mesma carga (8tonf no semi-eixo) e a mesma inflação de pneus (100psi) aplicado no “TRECHO SIMULADO 1”. O equipamento, nesta segunda etapa, ficou em funcionamento 923 horas (38 dias).

Ao todo, foram realizados 7 levantamentos nesta segunda etapa da pesquisa, buscando-se a realização um levantamento a cada semana de ensaio, ocorrendo variabilidades no intervalo de tempo do equipamento funcionando devido a períodos

de manutenção do mesmo. A Tabela 5.5 apresenta um resumo dos levantamentos do segundo ensaio.

Tabela 5.5: Resumo dos levantamentos do "TRECHO SIMULADO 2"

	<b>data</b>	<b>nº de ciclos</b>	<b>horas trabalhadas</b>
<b>1º levantamento</b>	02/agosto	0	0
<b>2º levantamento</b>	09/agosto	50.000	195
<b>3º levantamento</b>	24/agosto	80.000	310
<b>4º levantamento</b>	03/setembro	125.000	474
<b>5º levantamento</b>	19/setembro	187.000	692
<b>6º levantamento</b>	26/setembro	214.000	811
<b>7º levantamento</b>	02/outubro	255.000	923

### 5.2.2 Parâmetros estruturais

Assim como no primeiro trecho, a evolução das deflexões máximas do pavimento flexível foram obtidas com a Viga Benkelman e a Viga Eletrônica, sendo os resultados apresentados na Figura 5.11 e Figura 5.12, respectivamente.

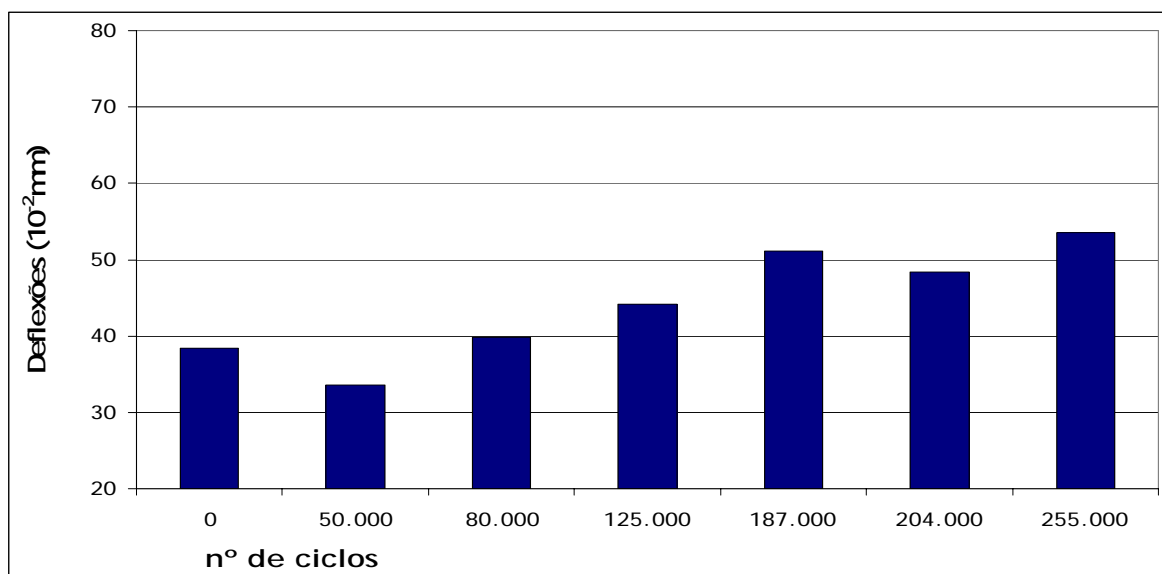


Figura 5.11: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman do "TRECHO SIMULADO 2"

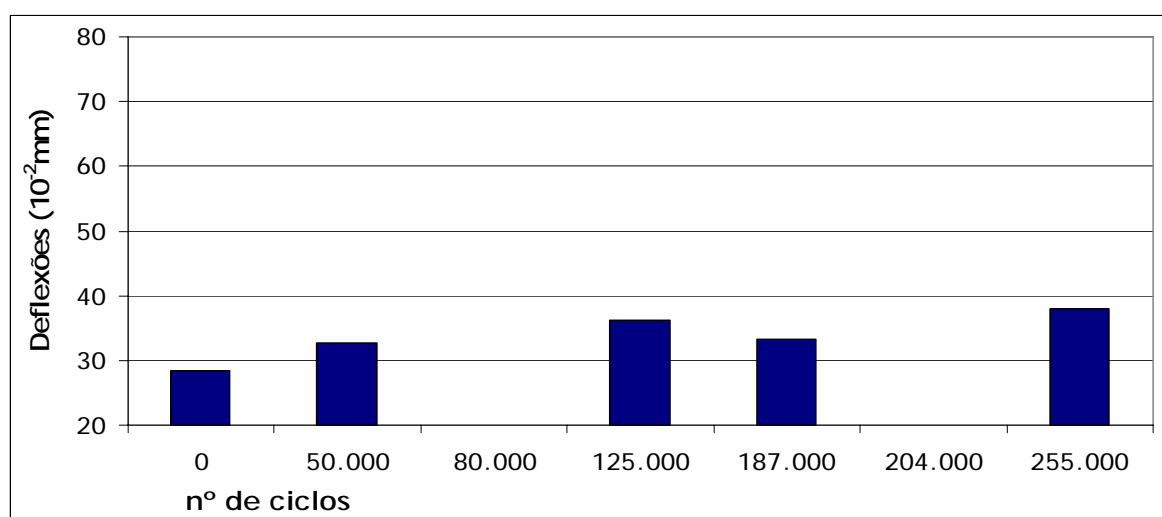


Figura 5.12: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Eletrônica do "TRECHO SIMULADO 2"

Em ambos os resultados, verifica-se uma tendência de crescimento das deflexões do pavimento quando submetido ao número de ciclos do Simulador de Tráfego. Para as medidas com a Viga Eletrônica, não foi possível a realização dos ensaios no segundo e sexto levantamento em virtude de problemas com o equipamento de ensaio.

Nos cinco levantamentos com a Viga Eletrônica, também foi possível verificar a distribuição das deflexões do pavimento com a determinação da bacia de

deslocamento. A Figura 5.13 apresenta a evolução também das bacias de deslocamento com o aumento do número de ciclos exercidos sobre o pavimento.

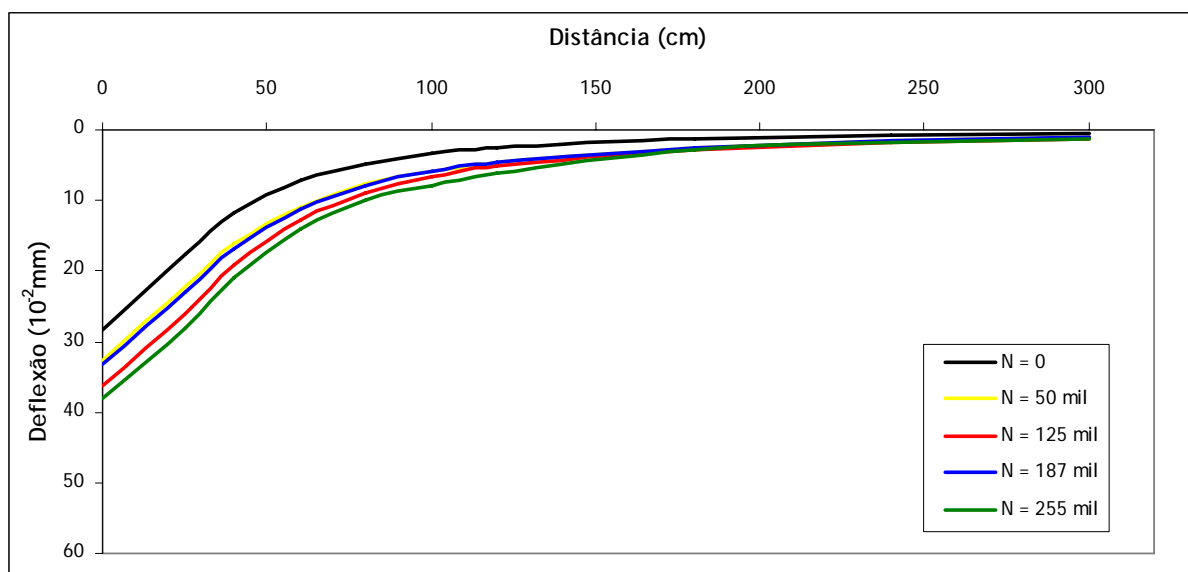


Figura 5.13: Evolução das bacias de deflexões obtidas com a Viga Eletrônica do "TRECHO SIMULADO 2"

Exceto o levantamento de 187mil ciclos, há uma tendência de acréscimo do nível deflectométrico do pavimento.

### 5.2.3 Parâmetros de comportamento

#### 5.2.3.1 Marcação de trincas

Para a marcação das trincas, adotou-se o mesmo critério estabelecido para o "TRECHO SIMULADO 1". No entanto, nesse segundo trecho, inicialmente não havia trincas no pavimento, visto que, embora construído em 2004, o trecho encontrava-se no acostamento da rodovia, sem sofrer a solicitação do tráfego real. Também é válido ressaltar que as trincas somente surgiram no pavimento a partir do terceiro levantamento. Desse modo, as trincas marcadas com a cor branca referem-se, nesse segundo trecho, às trincas surgidas após 80mil ciclos, como elucidado na Tabela 5.6, na qual apresenta-se a convenção de cores para o "TRECHO SIMULADO 2".



Tabela 5.6: Convenção de cores da marcação das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 2"

	<b>data</b>	<b>cor da tinta de marcação das trincas</b>
<b>1º levantamento</b>	02/agosto	-
<b>2º levantamento</b>	09/agosto	-
<b>3º levantamento</b>	24/agosto	branca
<b>4º levantamento</b>	03/setembro	amarela
<b>5º levantamento</b>	19/setembro	vermelha
<b>6º levantamento</b>	26/setembro	azul
<b>7º levantamento</b>	02/outubro	verde

Os resultados da evolução de trincamento para o "TRECHO SIMULADO 2" estão apresentados na Figura 5.14.

Observa-se que o surgimento de várias trincas com a evolução dos ensaios. No entanto, muitas trincas surgem isoladas, sem uma forma muito clara de entrelaçamento.

A Figura 5.15, por sua vez, apresenta a foto com a condição final de trincamento do segundo trecho ensaiado.

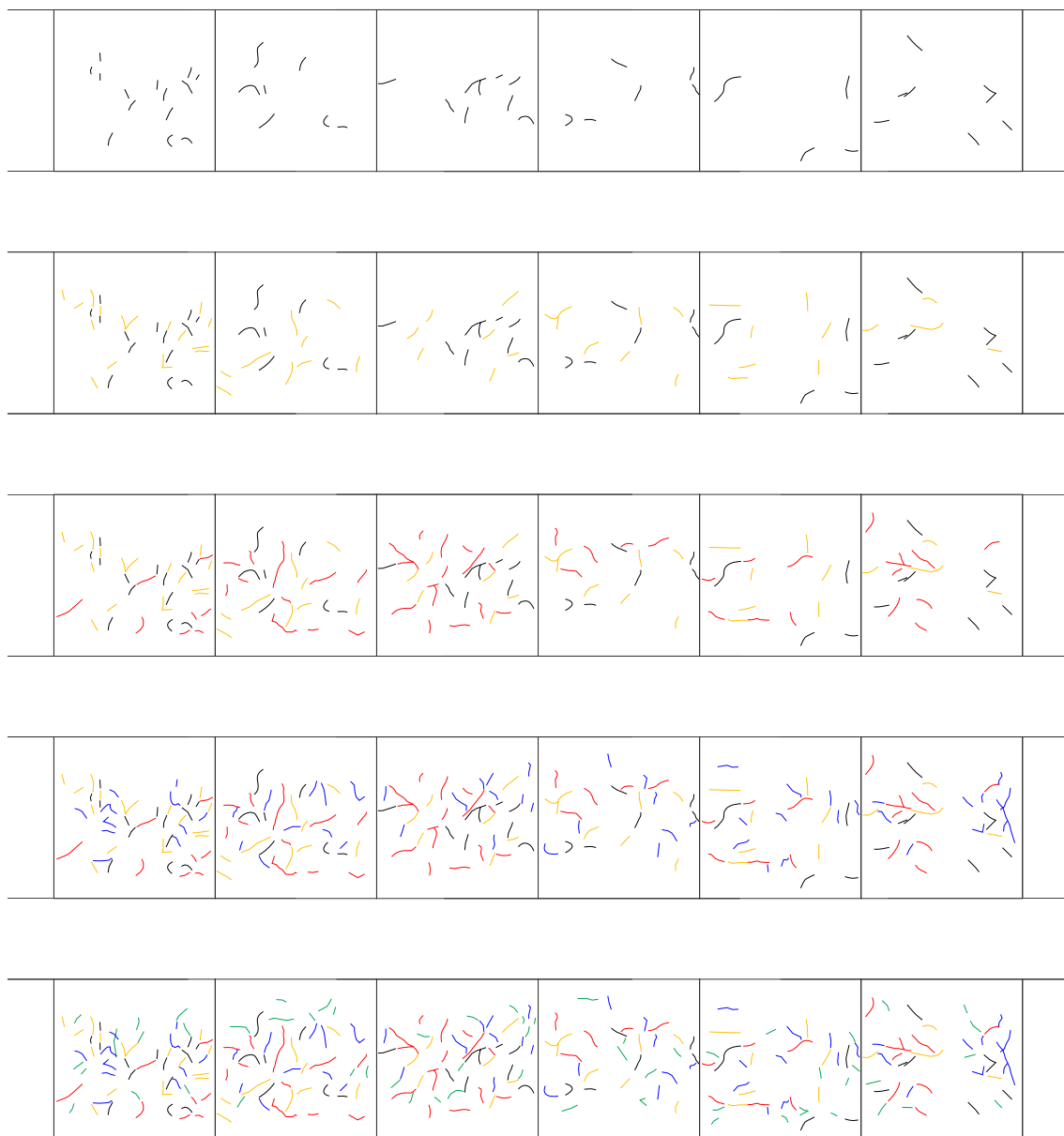


Figura 5.14: Evolução das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 2"



Figura 5.15: Foto da marcação das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 2"

Assim como no primeiro ensaio, para quantificar a evolução das trincas realizou-se as medidas do comprimento das mesmas. Desse modo, somando as extensões de todas as trincas, estabeleceu-se a taxa de evolução das trincas do pavimento, apresentada na Figura 5.16.

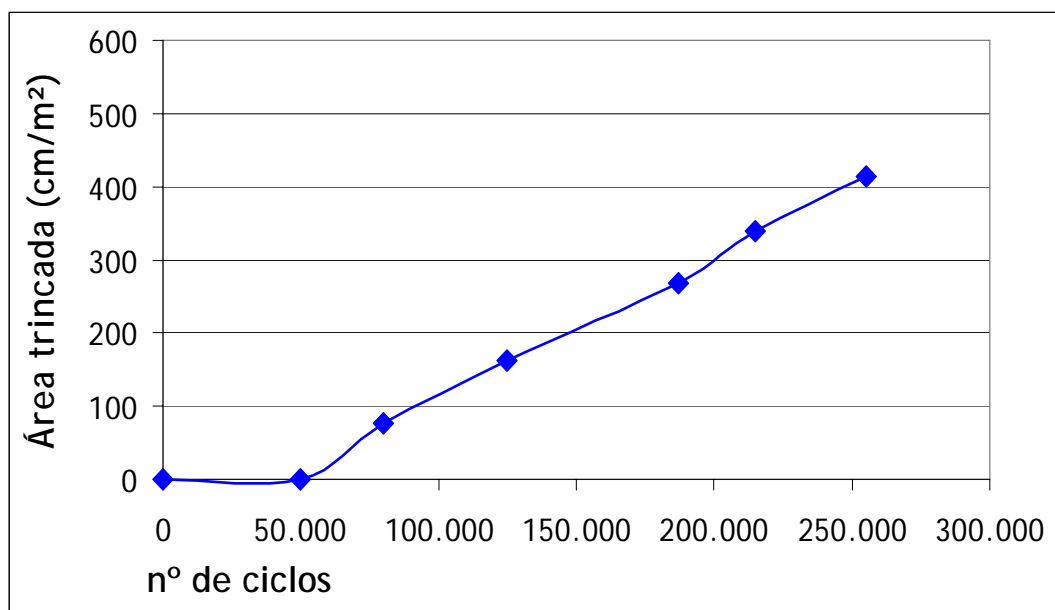


Figura 5.16: Taxa da evolução das trincas no pavimento do "TRECHO SIMULADO 2"

### 5.2.3.2 Deformações Permanentes

A Figura 5.17 fornece os dados da evolução das deformações permanentes média em cada levantamento, acompanhando a evolução em função do número de ciclos do Simulador.

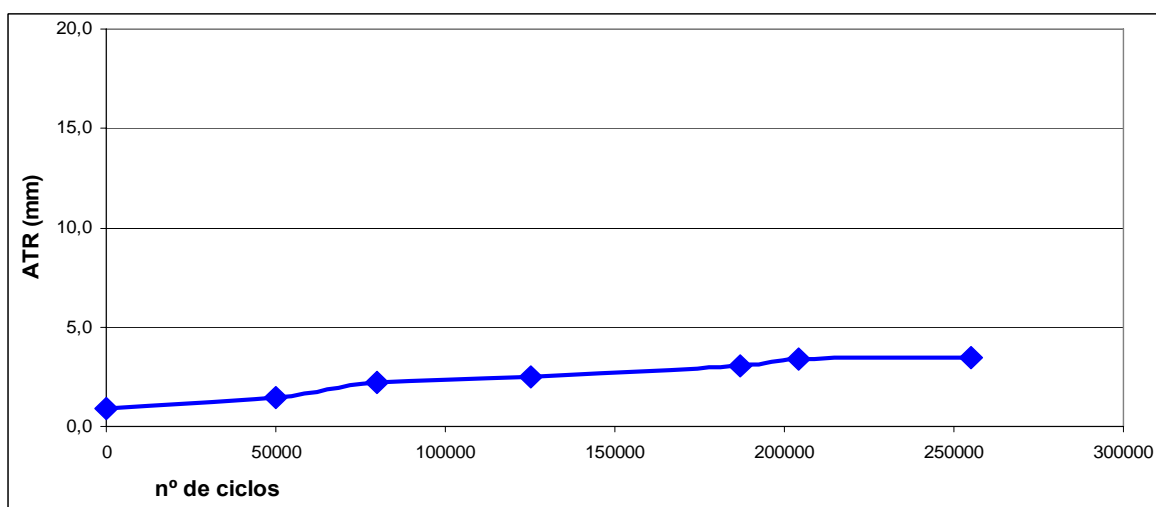


Figura 5.17: Evolução do afundamento de trilha de roda do pavimento do "TRECHO SIMULADO 2"

### 5.3.4 Parâmetros da textura do pavimento

Assim como no primeiro trecho, os resultados obtidos para avaliação da textura do pavimento não foram representativos, apresentando variabilidades e inconsistência nos resultados, definindo-se, portanto, em não apresentá-los, visto que não auxiliariam na análise do comportamento do pavimento.

### 5.3.5 Parâmetros ambientais

#### 5.3.5.1 Temperatura do ambiente

As medidas de temperatura obtidas diariamente junto ao Simulador durante os ensaios do "TRECHO SIMULADO 2" são apresentadas na Figura 5.18. A temperatura mínima, média e máxima do período de ensaios foi, respectivamente, 12, 16 e 19 °C.

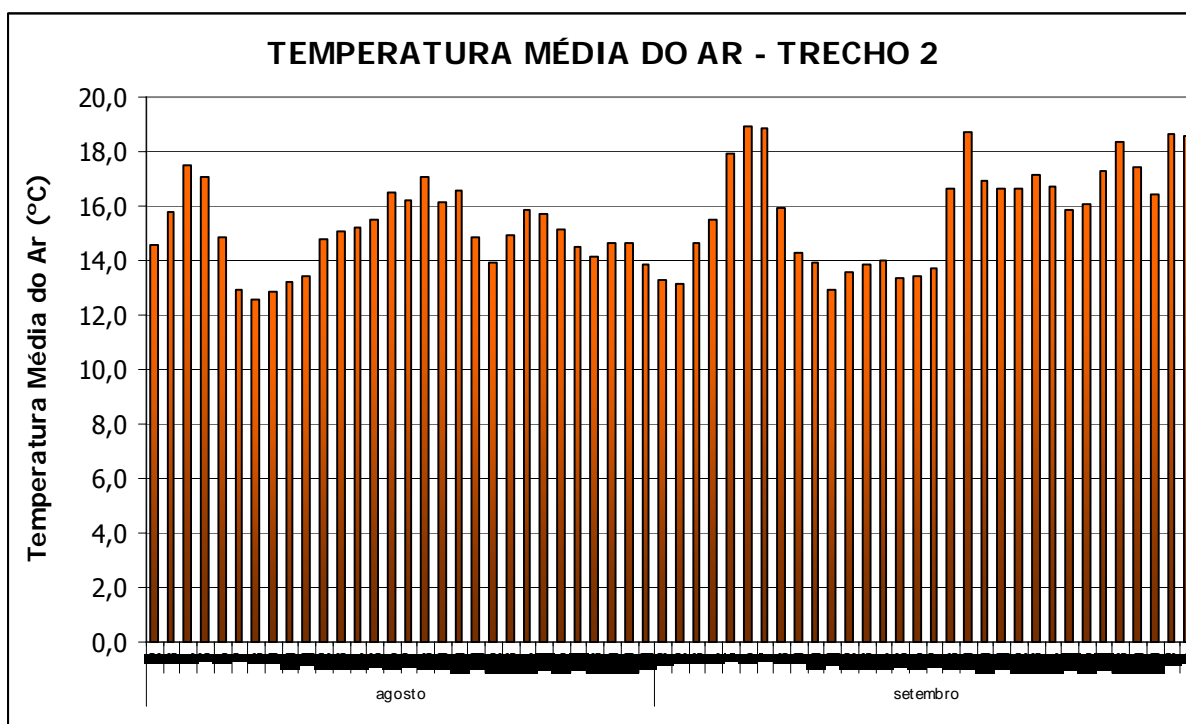


Figura 5.18: Temperatura média do ar durante o período de ensaios do "TRECHO SIMULADO 2"

### 5.2.5.2 Precipitação pluviométrica

As medidas de precipitação pluviométrica obtidas diariamente junto ao Simulador durante os ensaios do "TRECHO SIMULADO 2" são apresentadas na Figura 5.19. No total, durante o ensaio, ocorreu a precipitação de 223mm.

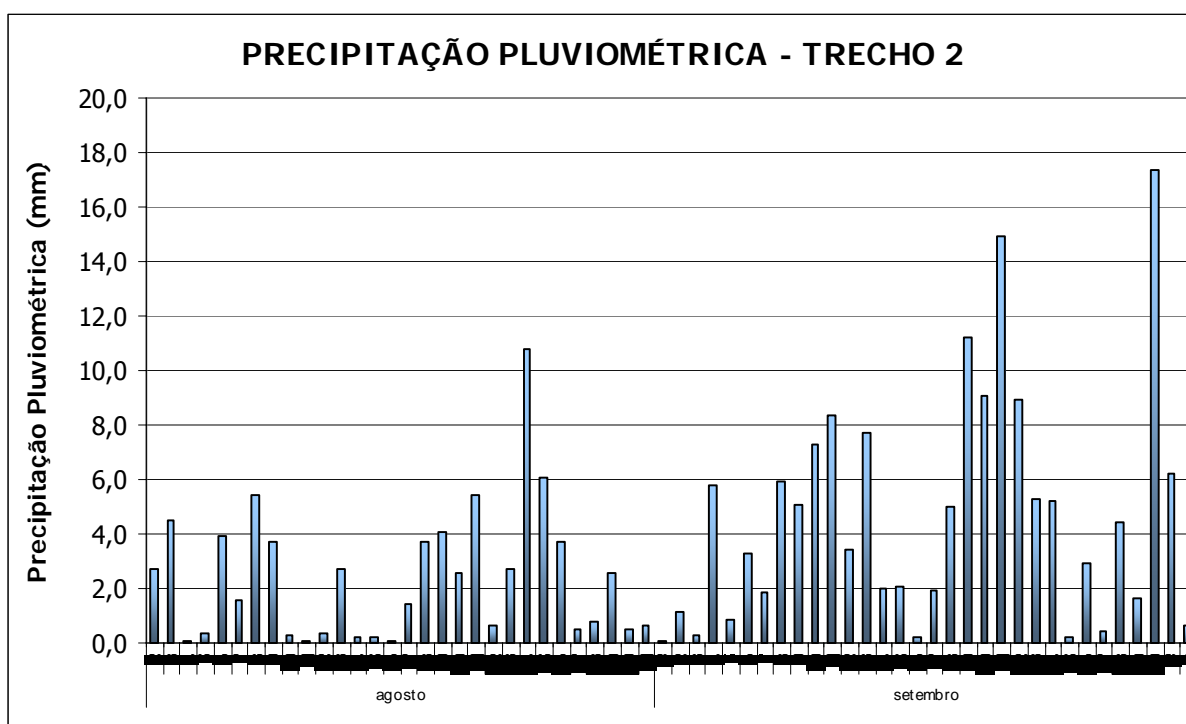


Figura 5.19: Temperatura média do ar durante o período de ensaios do "TRECHO SIMULADO 2"

### 5.3.6 Retiradas de amostras em campo

Novamente salienta-se que, embora a extração de corpos-de-prova de misturas asfálticas e de materiais granulares esteja incluída nesse trabalho, os resultados dos ensaios realizados com esses materiais, bem como a análise, fazem escopo de trabalhos futuros decorrentes deste.

## 5.4 COMPARAÇÃO DOS DOIS TRECHOS ENSAIADOS

A seguir, são apresentados em conjunto os resultados dos dois trechos ensaiados, no intuito de compará-los, verificando diferenças e semelhanças obtidas nos ensaios.

### 5.4.1 Parâmetros estruturais

Em relação às deflexões, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5.20, para Viga Benkelman, e na Figura 5.21, para Viga Eletrônica.

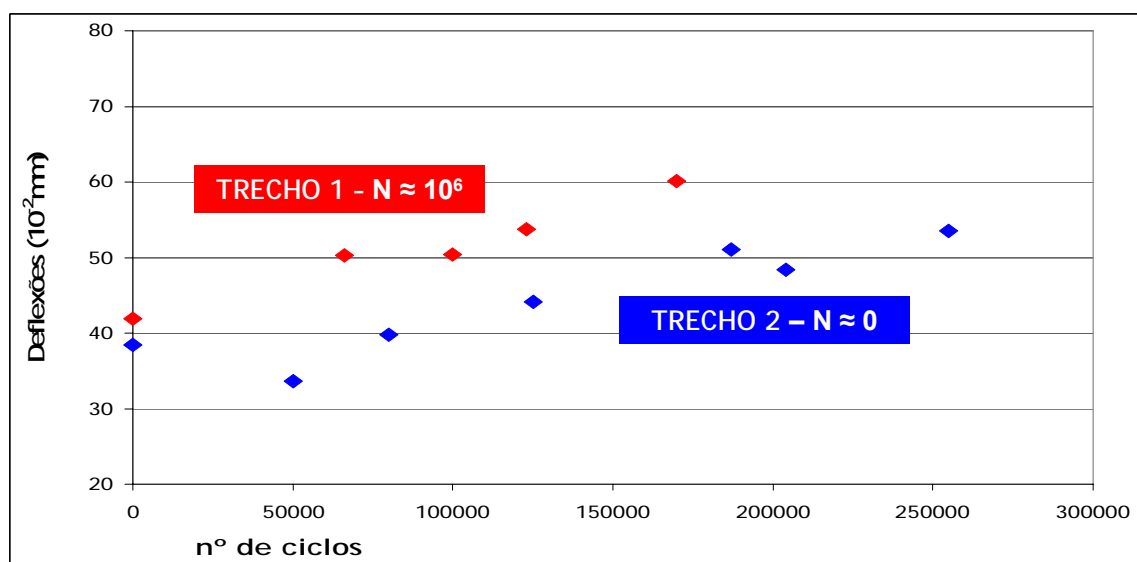


Figura 5.20: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman

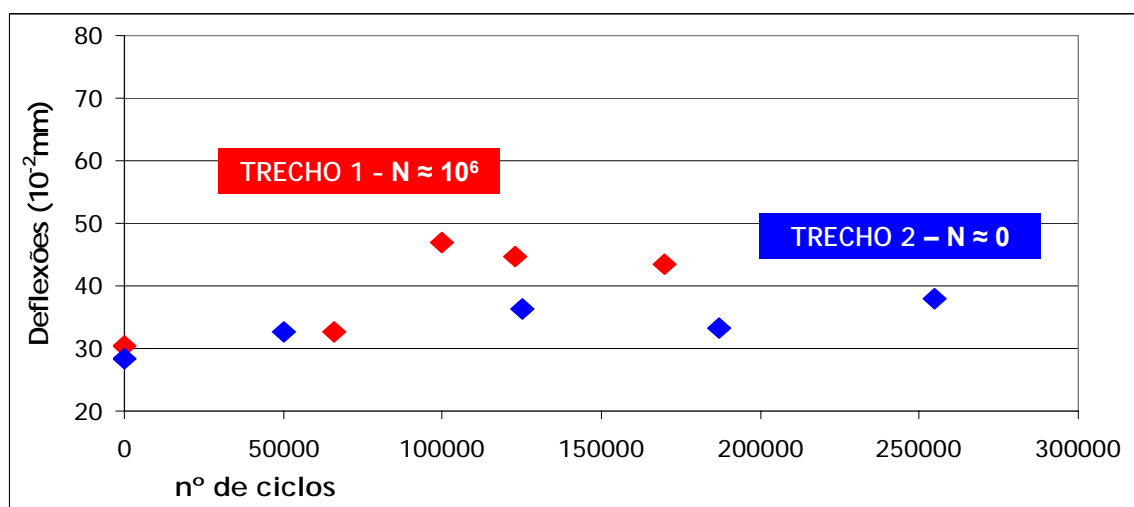


Figura 5.21: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Eletrônica

Para os resultados com a Viga Benkelman, observa-se evoluções representativas da magnitude das deflexões para os dois trechos ensaiados. Para a Viga Eletrônica, apenas os levantamentos do "TRECHO SIMULADO 1" é que superam a deflexão de  $40 \times 10^{-2}$  mm, ficando todos os demais pontos entre 30 e  $40 \times 10^{-2}$  mm.

## 5.4.2 Parâmetros de comportamento

### 5.4.2.1 Marcação de trincas

A respeito das evoluções das trincas, obteve-se, com os dois ensaios, os resultados apresentados na Figura 5.22.

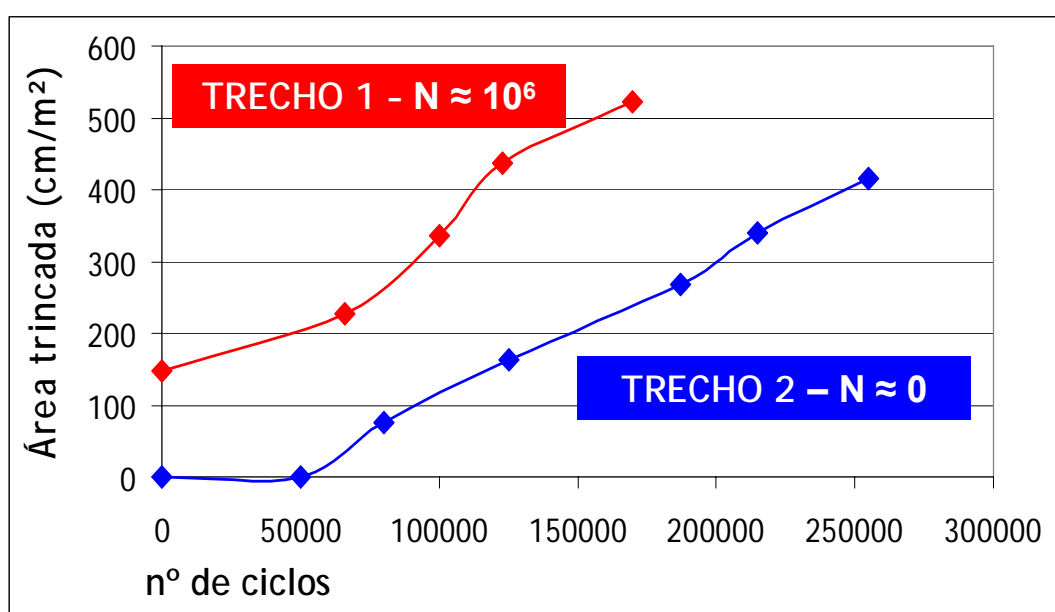


Figura 5.22: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman do "TRECHO SIMULADO 1"

A partir dos resultados, pode-se transladar a curva obtida no "TRECHO SIMULADO 1", no qual já havia trincas originadas do tráfego real da rodovia, obtendo-se o resultados da Figura 5.23, semelhante ao formato de modelo de desempenho esperado para o trincamento. Apenas é válido ressaltar que o "TRECHO SIMULADO



2" quase superou a área trincada do primeiro segmento ensaiado. No início da pesquisa, temia-se que ao realizar os ensaios com um trecho sem ter iniciado o processo de deterioração, não se atingiria níveis de trincamento suficientes para uma análise comportamental. No entanto, tal premissa não foi confirmada, como elucidado nos resultados. Também é importante destacar que as trincas foram avaliadas apenas em comprimento. Destaca-se que o "TRECHO SIMULADO 1" já possuía trincas, que, no decorrer do ensaio, tiveram suas larguras significativamente elevadas. Já o "TRECHO SIMULADO 2", embora possuísse no final dos ensaios uma significativa extensão de trincas (comprimento), todas elas possuíam dimensões mínimas.

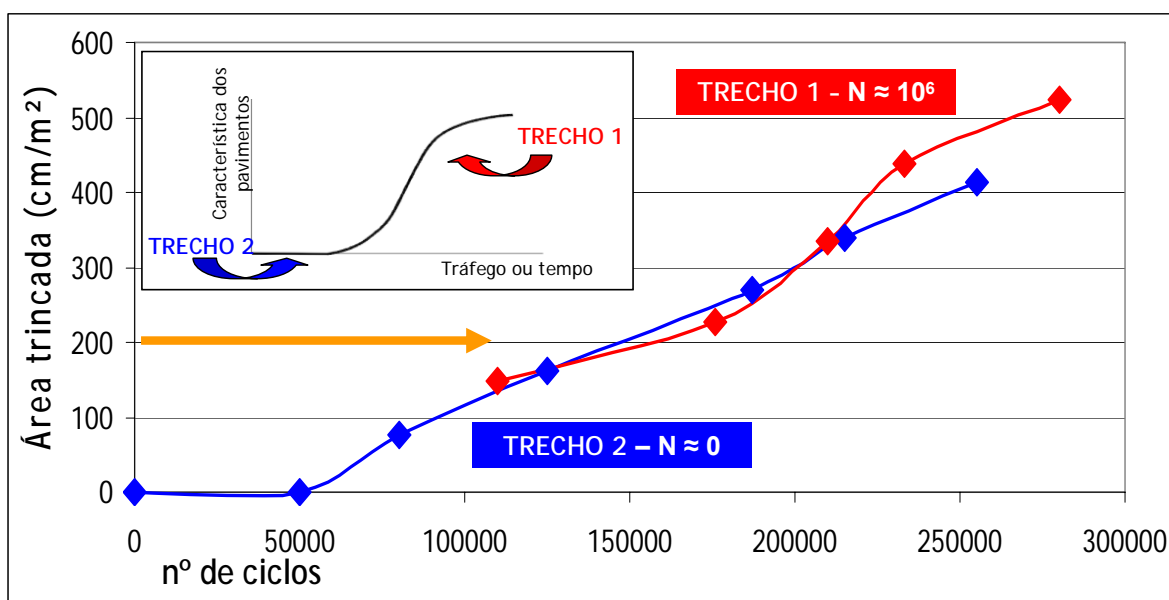


Figura 5.23: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman do "TRECHO SIMULADO 1"

#### 5.4.2.2 Deformações Permanentes

Para as deformações permanentes, obteve-se os resultados apresentados na Figura 5.24. Para esse parâmetro, não é possível comparar os valores dos dois trechos, visto a diferença de magnitude. No entanto, ambos apresentaram uma taxa de crescimento semelhante.

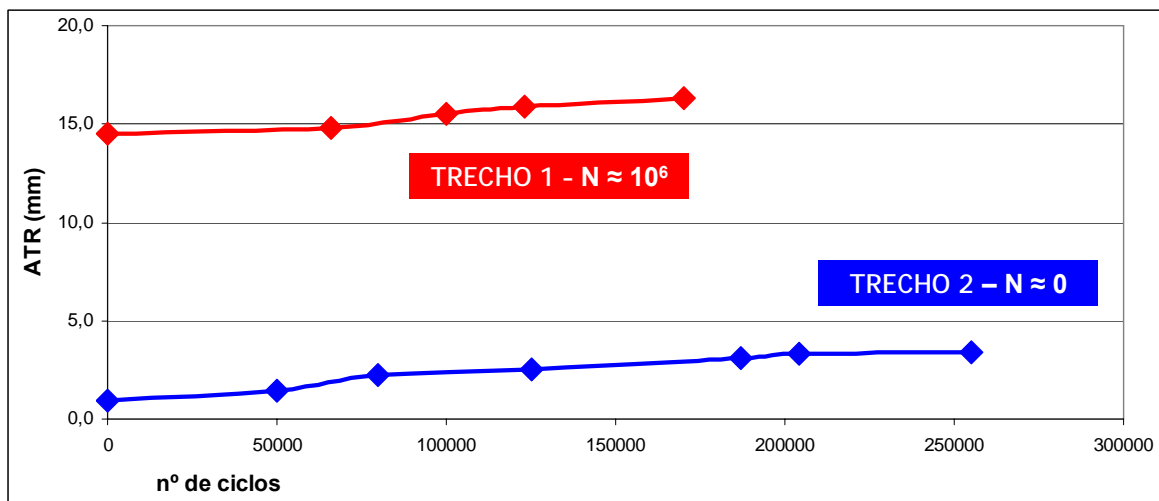


Figura 5.24: Evolução do afundamento de trilha de roda

### 5.4.3 Resumo dos resultados

No quadro da Figura 5.25 são apresentados os resumos dos resultados obtidos nos ensaios com o Simulador de Tráfego, destacando as quatro condições finais de pavimento verificadas no local do ensaio.

	TRECHO SIMULADO 1		TRECHO SIMULADO 2	
	condição A (antes do ensaio)	condição B (após ensaio)	condição C (antes do ensaio)	condição D (após ensaio)
	$N_{\text{tráfego real}} \approx 10^6$	$n_{\text{simulador}}: 170\text{mil}$	$N_{\text{tráfego real}} \approx 0$	$n_{\text{simulador}}: 250\text{mil}$
DEFLEXÕES [ $10^{-2}\text{mm}$ ] (Viga Benkelman)	42	60	38	54
DEFLEXÕES [ $10^{-2}\text{mm}$ ] (Viga Eletrônica)	30	44	28	38
ATR [mm]	14	16,5	0,9	3,4
Área trincada [cm/m <sup>2</sup> ]	148	523	0	415

Figura 5.25: Quadro resumo das condições finais do local em que foi ensaiado o pavimento com o Simulador de Tráfego

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais conclusões referentes aos ensaios realizados e quanto ao desempenho apresentado pelas estruturas de pavimento asfáltico foram:

A técnica de ensaios acelerados, através da utilização do Simulador de Tráfego Móvel, modelo HVS, mostrou-se adequada para a obtenção das respostas estruturais e funcionais dos pavimentos, em curto espaço de tempo. Os níveis de degradação, obtidos em 2 meses de ensaio em cada recapeamento foram suficientes para a avaliação das condições dos pavimentos estudados. Ainda assim, conseguiram-se dados importantes que não seriam possíveis em uma análise realizada em rodovias submetidas ao tráfego real, no mesmo período.

O Simulador de Tráfego Móvel – HVS da Simular apresentou características muito versáteis. Entre elas destacam-se a mobilidade de transporte, a facilidade da variação das cargas, a possibilidade de ajustes funcionais elétricos e mecânicos necessários para cada pesquisa, embora inicialmente alguns problemas elétricos e mecânicos ocasionaram um pequeno atraso nos ensaios.

Em relação aos parâmetros ambientais, não houve diferenças de temperatura e de precipitações pluviométricas entre o primeiro e o segundo ensaio realizado com o Simulador que pudessem interferir na comparação dos resultados.

### 6.1 “TRECHO SIMULADO 1”

O trecho que já havia sofrido durante mais de dois anos a ação do tráfego real da rodovia BR-290/RS apresentou evolução em todos os parâmetros considerados nessa pesquisa.

As deflexões evoluíram mais de 40%, para a Viga Benkelman e para a Viga Eletrônica.

A extensão total das trincas triplicou. Em relação às trincas, destaca-se que inicialmente elas eram todas transversais, sem entrelaçamento e de pequena largura. Após os ensaios, muitas outras trincas surgiram a partir das já existentes, interligando-se a elas, e sua largura ficou bastante acentuada.

O afundamento de trilha de roda inicial era bastante elevado, possivelmente devido a questões executivas da ampliação da plataforma da rodovia. O crescimento foi um pouco superior a 10%, tendo evoluído 0,01mm a cada 1.000 ciclos.

## 6.2 "TRECHO SIMULADO 2"

O trecho do segundo ensaio, com a mesma estrutura do primeiro, apenas sem ter sofrido o tráfego anteriormente à pesquisa, uma vez que ficava no acostamento da rodovia também apresentou evolução em todos os parâmetros de desempenho do pavimento.

As deflexões evoluíram mais de 42%, para a Viga Benkelman e 35% para a Viga Eletrônica.

As trincas surgiram somente após 50.000 ciclos do Simulador. No entanto, as trincas evoluíram progressivamente, concluindo-se os ensaios com 415cm/m<sup>2</sup> de taxa de trincas no pavimento. Também é válido ressaltar que mesmo após os ensaios, as trincas possuíam largura mínima, sendo identificadas apenas observando detalhadamente a pista.

O afundamento de trilha de roda foi o único parâmetro que ao final do ensaio ficou bastante distante do inicial do "TRECHO SIMULADO 1", embora tenha quase triplicado ao longo do ensaio. O afundamento de trilha inicial era decorrente de aspectos construtivos, pois o tráfego real não havia, nesse trecho, solicitado o pavimento. Assim como no outro trecho, o afundamento de trilha de roda foi de 0,01mm a cada 1.000 ciclos.

## 6.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir do volumoso banco de dados obtidos com essa pesquisa, ficam as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- × Analisar o banco de dados gerados durante os ensaios acelerados de pavimentos, organizando e classificando as informações de tráfego, clima, e desempenho dos pavimentos ensaiados.
- × Desenvolver modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis de rodovias com volume de tráfego elevado, em termos de deflexões, área trincada e afundamento de trilha de roda (a partir da evolução desses parâmetros obtidos nos ensaios acelerados realizados em 2007).
- × Quantificar os efeitos climáticos (temperaturas e precipitações pluviométricas) na evolução das degradações (especialmente no trincamento) sofridas pelo pavimento.
- × Quantificar o efeito da velocidade de aplicação de carga na evolução das deformações e do trincamento de pavimentos flexíveis. Observa-se que esta quantificação é condição indispensável para a interpretação de resultados de ensaios acelerados e sua extensão a pavimentos solicitados por cargas reais. De fato, os simuladores de tráfego lineares aplicam as cargas a velocidades muito baixas (7 km/h), o que gera, em pavimentos com espessas camadas asfálticas, deformações de maior magnitude do que as causadas por cargas aplicadas a velocidades normalmente desenvolvidas por veículos comerciais (? 60 a 80 km/h). Por isso, também, as degradações se processam muito mais rapidamente em pavimentos solicitados por simuladores de tráfego do que em pavimentos solicitados por tráfego comercial real.
- × Realizar ensaios de extração de ligante e granulometria dos agregados em corpos-de-prova extraídos nos trechos ensaiados e adjacentes aos mesmos. Realizar ensaios de fadiga sob tensão controlada e de deformações permanentes sob cargas repetidas em corpos-de-prova de misturas asfálticas amostrados nas adjacências dos trechos ensaiados. Realizar ensaios de módulo de resiliência e deformações permanentes sob cargas repetidas em solos de subleito e demais materiais granulares constituintes do pavimento solicitado pelo simulador.

- ✖ Analisar os resultados dos ensaios mencionados no item anterior, inserindo sua interpretação na análise dos resultados de ensaios acelerados realizados com o simulador de tráfego.

## REFERÊNCIAS

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

AZAMBUJA, D. M. Estudo de Recapeamentos Asfálticos de Pavimentos Através de Ensaios Acelerados. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BROWN, S. F. & BRODRICK, B. V. 25 years experience with the pilot-scale Nottingham Pavement Test Facility. International Conference on Accelerated Pavement testing Reno, Nevada, 1999.

FRITZEN, M. A. Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimento Asfáltico com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

GONÇALVES, F. P. Estudo Experimental do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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

MERIGHI, J. V. Utilização de Simulador de Tráfego para Análise de Comportamento de Misturas Asfálticas, 29ª RAPv, Mato Grosso, Cuiabá, 1995.

NOKES, W. A., STOLARSKI, P. J., MONISMITH, C. L., HARVEY, J. T. Establishing the California Department of Transportation Accelerated Pavement Testing Program. 1999.

NÚNES, W. P. Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários com Basaltos Alterados. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

PEREIRA, A. S. "Utilização de Geotêxtil em Reforço de Pavimentos Aplicado em um Trecho Experimental". Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

PINTO, S. Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos

RODRIGUES, R. M. "Projeto e Gerência de Pavimentos", Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, 1995.

SÁ, M. F. P. Influencia do Tráfego na Infraestrutura Viária e Misturas Asfálticas para Corredores de Ônibus Testadas em Simuladores de Tráfego. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

SIILVA, P. D. E. A. Contribuição Para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPV2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

VIEIRA, C. S. Construção de Pista Experimental com Geotêxteis Não-Tecidos para Estudo de Reflexão de Trincas em Revestimentos Asfálticos, 32ª RAPv, Distrito Federal, Brasília, 2000.

WICKBOLDT, V. S. Ensaios acelerados de pavimentos para avaliação de desempenho de recapeamentos asfálticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.



## **Equipe executora**

Coordenador: Professor DSc. Jorge augusto Pereira Ceratti

Equipe técnica: Professor Dr. Washington Peres Núñez

Equipe de Assessores: Eng Daniel Ramos Vitorino (Mestrando do PPGEC/UFRGS);

Eng MSc Fernando Albuquerque (doutorando do PPGEC)

Equipe de apoio: Andréas Ostermann (aluno de Graduação)

João Bozanini (aluno de Graduação)

Diego Treichel (aluno de Graduação).



## **ANEXOS**



**CONCEPA**  
free way

**O pedágio  
que dá retorno**

# Simulador de Tráfego

**para avaliação do  
desempenho  
de pavimentos asfálticos**

**Parceiros nesta pesquisa:**



