

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia  
BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel**

**Daniel Ramos Victorino**

Porto Alegre  
2008

DANIEL RAMOS VICTORINO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM PAVIMENTO  
FLEXÍVEL DA RODOVIA BR-290/RS SOLICITADO POR UM  
SIMULADOR DE TRÁFEGO MÓVEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Dr. Washington Peres Núñez.

Porto Alegre

2008

V646a Victorino, Daniel Ramos

Análise de desempenho de um pavimento flexível da rodovia BR-290/RS solicitado por um simulador de tráfego móvel / Daniel Ramos Victorino. – 2008.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientador – Prof. Dr. Washington Peres Núñez

1. Pavimentos flexíveis. 2. Ensaios acelerados. 3. Tráfego – Simulador. 4. Pavimentação – Ensaios. I. Núñez, Washington Peres, orient. II. Título.

CDU-625.85(043)

DANIEL RAMOS VICTORINO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM PAVIMENTO  
FLEXÍVEL DA RODOVIA BR-290/RS SOLICITADO POR UM  
SIMULADOR DE TRÁFEGO MÓVEL**

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

Porto Alegre, 25 de setembro de 2008.

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. Pelo PPGEC/UFRGS  
Orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**Profa. Laura Maria Goretti da Motta (COPPE – UFRJ)**  
D.Sc. pela COPPE – UFRJ

**Profa. Liédi Légi Bariani Bernucci (EPUSP)**  
Dra. pela Escola Politécnica da USP

**Prof. João Fortini Albano (PPGEP/UFRGS)**  
Dr. pelo PPGEP/UFRGS

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

Dedico este trabalho a minha família e a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a realizá-lo

## AGRADECIMENTOS

A plena realização deste trabalho somente foi possível com o apoio e a colaboração de certas pessoas, empresas e instituições. Agradeço a todos que de alguma forma participaram diretamente ou indiretamente desta dissertação, com orientações técnico-científicas ou simplesmente com incentivo e amizade nas horas mais difíceis. A seguir, destaco alguns agradecimentos especiais, que julgo importantes e necessários.

Ao meu orientador, Prof. Washington P. Núñez, pelo total apoio em todas as fases desta pesquisa, me auxiliando nas análises dos resultados obtidos, sempre me motivando para a conclusão do trabalho, com seu entusiasmo contagiante e palavras de amizade.

Ao Prof. Jorge A. P. Ceratti pelo incentivo, conhecimento e confiança depositada. Admiro a sua competência na coordenação do Laboratório de Pavimentação (LAPAV), fazendo deste um dos laboratórios mais conceituados do Brasil.

À professora Wai Gehling, que abriu as portas à pesquisa acadêmica para mim e, em particular, ao ramo da pavimentação.

A todos da equipe do LAPAV, pela convivência de quase seis anos (embora ultimamente esteja de certo modo afastado). Agradecimento especial ao bolsista Diego Treichel, que muito me ajudou nos ensaios de laboratório.

Do time da pavimentação, também agradeço aos colegas Fernando Albuquerque, Klaus Theisen, Luciana Rohde e Rodrigo Malysz, pelo apoio e conhecimentos transmitidos. À Mirtes Ramires pelo incentivo à pesquisa no início de minha vida acadêmica. Ao colega e amigo Lélío Brito, sempre disponível para enriquecedoras discussões técnicas.

Aos colegas de mestrado Anderson Fonini, Leandro Taytelbaum, Milena Tomasi, Salete Dalla Rosa, Tadeu de Cezaro Jr. e Talita Miranda.

Aos amigos da graduação Eduardo Borba (*in memoriam*), Elias Rigon, Guilherme Biesek, Ivan Zampiron, Juliana Vivian, Lucas Festugato, Paulo Pasquali, Rodrigo Aguzolli e Serguem Trott. À Juliana pelas seguidas conversas de apoio. Ao Guilherme e ao Rodrigo pela preservação da forte amizade, mesmo com o inevitável distanciamento.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela formação acadêmica, possibilitando, através de seu excelente corpo docente, um ensino de qualidade. Dos professores do curso, além dos já citados, agradeço também, em especial, aos professores Bica e Bressani.

À Concepa por proporcionar esta pesquisa e por acreditar e contribuir em minha qualificação profissional, em especial a diretoria e toda a equipe do Setor de Engenharia da empresa. Ao Eng. Thiago Vitorello, por depositar confiança em meu trabalho profissional e incentivo no desenvolvimento deste estudo.

À Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) que, através da verba para desenvolvimento de pesquisas, possibilitou a realização dos ensaios desta dissertação.

Às empresas TPI – Triunfo Participações e Investimentos, SBS Engenharia e Simular.

Ao Consórcio Construtor TRS, em especial aos Engenheiros Osmar Garcia e Cristiano Caumo e ao encarregado do laboratório Elias Rodrigues, pelos auxílios nos levantamentos de campo.

À Rita de Cássia Lumertz pelo apoio e compreensão nesses últimos meses.

Por último, os agradecimentos mais especiais, que são aos meus pais, Odilon e Doris, e a minha irmã, Aline, que, de forma incondicional, estiveram ao meu lado em todos os momentos de minha vida, disponibilizando todo o apoio, carinho e compreensão necessários para vencer cada batalha defrontada (esta dissertação é mais uma!). Obrigado por estarem comigo em mais esta etapa. Estendo esse agradecimento também a todos os meus demais familiares.

"Saber o que fazer é sabedoria; saber como fazer é  
bravura; fazê-lo é virtude".

*autor desconhecido*

## RESUMO

VICTORINO, D.R. Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Estimar com acurácia a vida útil de um pavimento é um dos maiores desafios que enfrentam os engenheiros rodoviários. Recentemente uma nova ferramenta tem sido utilizada para estimar de forma mais realista o desempenho de pavimentos; trata-se dos simuladores de tráfego. Neste contexto, esta dissertação apresenta um estudo do comportamento de um pavimento flexível típico da Região Sul do Brasil, submetido a ensaios acelerados com um simulador de tráfego linear móvel (semelhante ao HVS da República Sul-Africana). O pavimento encontra-se na rodovia BR-290, uma das principais vias do Rio Grande do Sul, que está desde 1997 sob concessão à iniciativa privada. De maio a outubro de 2007 duas seções testes com idêntica estrutura de pavimento, construídas em outubro de 2004, foram solicitadas pelo simulador de tráfego. A primeira seção teste, situada na faixa externa da pista, tinha sido solicitada pelo tráfego real (com elevada concentração de veículos de carga), estimando-se que, desde a construção até o início dos ensaios acelerados, recebera aproximadamente  $4,0 \times 10^6$  operações equivalentes do eixo padrão (eixo simples com rodas duplas com carga igual a 8,2 tf), calculadas empregando-se os fatores de equivalência de carga da AASHTO ( $N_{AASHTO}$ ). A outra seção teste, por estar situada no acostamento da rodovia, praticamente não tinha sido previamente solicitada pelo tráfego. O simulador de tráfego aplicou a essas seções testes, respectivamente, 170 mil e 255 mil ciclos de carga de um semi-eixo simples de rodas duplas de 8 tf (equivalente a carga de eixo de 16 tf). Para acompanhar o comportamento do pavimento, mediram-se, ao longo dos períodos de ensaio, deflexões e afundamentos nas trilhas de rodas. Trincas foram medidas e mapeadas, calculando-se um índice de densidade de trincamento. Dados de temperatura e precipitação pluviométrica também foram obtidos. As medidas de campo evidenciaram uma significativa aceleração na degradação do pavimento quando submetido à ação do simulador. Com os ensaios acelerados concluídos, amostras das camadas asfálticas das duas seções testes foram extraídas, determinando-se em laboratório valores de resistência à tração, módulo de resiliência (com diferentes tempos de carga) e curvas de fadiga. Desse modo, foi possível estimar a tendência de desempenho do pavimento desde a sua construção até o término de sua vida de serviço, comparando-se a ação do simulador com a do tráfego real. Na análise foram considerados os efeitos da velocidade (baixa) do carregamento imposto pelo simulador de tráfego nos módulos de deformabilidade do ligante asfáltico e da mistura asfáltica. Também foi avaliado o efeito acelerador na degradação do pavimento, decorrente das elevadas tensões geradas pela carga de eixo do simulador, muito superior às correspondentes a veículos comerciais. Assim, estimou-se que um ciclo de carga (carga de eixo de 16 tf) do simulador móvel, aplicado à velocidade de 8 km/h, corresponde à passagem de 30 a 40 eixos padrão, na velocidade do tráfego real, e que a vida de serviço do pavimento analisado é de aproximadamente  $8,2 \times 10^6$  eixos padrão ( $N_{AASHTO}$ ).

**Palavras-chave:** pavimentos flexíveis; ensaios acelerados; simulador de tráfego móvel; vida de serviço de pavimentos.

## ABSTRACT

VICTORINO, D.R. Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The accurate prediction of pavements lives is one of the most difficult challenges that Pavement Engineers face. Traffic simulators have been recently used as a new tool to improve the prediction of pavements performances: In this context, this MSc Thesis presents a study on the behavior of an asphalt pavement with structure typical of those built in Southern Brazil, submitted to accelerated testing by a mobile traffic simulator (similar to the South African HVS). The pavement is on BR-290, one of the most important highways in Rio do Grande do Sul (Brazil southernmost state); a toll-road since 1997. From May to October 2007, two test sections with identical structures, built in 2004, were loaded by the traffic simulator. The first section was in one of the outer lanes of the highway and before the beginning of accelerated tests had been trafficked by some 4 million ESALs (82 kN equivalent single axle loads). The other test section, since was on one of the highway shoulders, had practically received no traffic. The traffic simulator applied 170,000 and 255,000 repetitions of 160-kN axle load to those test sections, respectively. In order to follow pavement performance along the traffic periods, deflections and rut depths were measured. Cracks were mapped as soon as they appeared and a Cracking Density Index was computed. Air temperature and rainfall data were also stored. Field measurements displayed a remarkably acceleration in pavements distress due to the traffic simulator action. After accelerated testing ending, asphalt mixes specimens were cored and tested to tensile strength and resilient modulus. Fatigue curves were also obtained through laboratory testing. Accelerated testing, complemented by laboratory results, allowed estimating a tendency for pavement performance, from construction to the end of its service live, and comparing the action of the traffic simulator to that of real traffic. The effects of the low loading speed of the traffic simulator on the asphalt binder and asphalt mixture resilient modulus were evaluated; as well as the acceleration of pavements distress due to high stresses generated by the traffic simulator axle load, that largely exceeds those applied by commercial vehicles. Thus, it was estimated that a loading cycle (160-kN axle load) of the traffic simulator, applied at 8 km/h, would cause the same distress than 30 to 40 ESALs applied at commercial speed. It was also concluded that the service life of the analyzed pavement structure was approximately 8.2 million ESALs.

**Key-words:** asphalt pavements; accelerated testing; mobile traffic simulator; pavement; service life.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	22
1.2 OBJETIVO GERAL.....	25
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	26
<b>2 UMA BREVE REVISÃO SOBRE SIMULADORES DE TRÁFEGO .....</b>	<b>28</b>
2.1 SIMULADORES DE TRÁFEGO DE LABORATÓRIO.....	30
2.1.1 Simulador de Tráfego da USP - LCPC .....	31
2.1.2 Analisador de Pavimento Asfáltico – APA.....	33
2.2 SIMULADORES DE TRÁFEGO CIRCULARES.....	35
2.2.1 Estudos desenvolvidos com o Simulador de Tráfego IPR/DNER... 38	
2.3 SIMULADORES DE TRÁFEGO LINEARES.....	39
2.3.1 Estudos desenvolvidos com o Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS .....	43
2.4 SIMULADORES DE TRÁFEGO MÓVEL, TIPO HVS.....	46
2.4.1 Estudos desenvolvidos com os Simuladores de Tráfego Móvel – HVS – no Brasil.....	48
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>50</b>
3.1 CENÁRIO DO EXPERIMENTO .....	50
3.1.1 Características da rodovia BR-290/RS.....	51
3.1.2 Definição da estrutura avaliada .....	55
3.1.2.1 Revestimento asfáltico .....	56
3.1.2.2 Camada de base.....	59
3.1.2.3 Camada de sub-base .....	60
3.1.2.4 Camada de reforço de subleito .....	60
3.1.3 Definição do local dos ensaios acelerados .....	60
3.1.4 Condições a serem ensaiadas .....	64
3.2 CARACTERÍSTICAS DO SIMULADOR DE TRÁFEGO EMPREGADO NA PESQUISA .....	68

3.2.1	Resumo das configurações do simulador de tráfego adotadas nesta pesquisa .....	78
3.2.1.1	Carregamento aplicado pelo simulador .....	78
3.2.1.2	Distribuição transversal das cargas .....	80
3.2.1.3	Simulação das precipitações pluviométricas .....	81
3.3	PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO EM CAMPO .....	81
3.3.1	Medidas deflectométricas .....	82
3.3.2	Evolução do trincamento .....	84
3.3.3	Deformações permanentes .....	85
3.3.4	Parâmetros ambientais .....	86
3.4	PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO .....	87
3.4.1	Retiradas de amostras em campo e preparação para ensaios .....	87
3.4.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	90
3.4.3	Ensaio de módulo de resiliência .....	91
3.4.3.1	Variação do tempo de aplicação de carga nos ensaios .....	93
3.4.3.2	Variação da forma do pulso de carga nos ensaios .....	95
3.4.3.3	Variação do módulo de resiliência de misturas asfálticas com a temperatura .....	97
3.4.4	Ensaio de fadiga .....	98
3.4.5	Matriz experimental dos ensaios laboratoriais .....	100
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
4.1	ENSAIOS DE CAMPO .....	101
4.1.1	Histórico de carregamento .....	101
4.1.2	Medidas deflectométricas .....	103
4.1.3	Evolução do trincamento .....	107
4.1.4	Deformações permanentes .....	113
4.1.5	Parâmetros ambientais .....	114
4.1.5.1	Temperatura do ambiente .....	114
4.1.5.2	Precipitação pluviométrica .....	115
4.1.6	Resumo dos resultados dos ensaios de campo .....	116
4.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	118
4.2.1	Ensaio de resistência à tração .....	121
4.2.2	Ensaio de módulo de resiliência .....	122
4.2.2.1	Tempo do pulso de carga de 0,1s .....	122

4.2.2.2 Tempo do pulso de carga de 0,2s .....	123
4.2.2.3 Variação do MR com a temperatura .....	126
4.2.3 Ensaio de fadiga.....	127
<b>5 UMA TENTATIVA DE EXTRAPOLAR OS RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS PARA O DESEMPENHO DO PAVIMENTO SOLICITADO PELO TRÁFEGO REAL .....</b>	<b>131</b>
5.1 TÉRMINO DE VIDA DE SERVIÇO DOS PAVIMENTOS ENSAIADOS .....	131
5.2 RELAÇÃO DOS ENSAIOS ACELERADOS COM O TRÁFEGO REAL .....	132
5.2.1 Velocidade da aplicação da carga .....	133
5.2.2 Carga de solicitação empregada.....	137
5.2.3 Efeito em conjunto da velocidade e da carga de solicitação empregada pelo simulador.....	138
5.3 REAPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS CONSIDERANDO O FATOR SIMULADOR-TRÁFEGO REAL.....	138
5.3.1 Medidas deflectométricas.....	139
5.3.2 Evolução do trincamento.....	141
5.3.3 Deformações permanentes .....	142
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>143</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	143
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	147
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EM CAMPO.....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO .....</b>	<b>167</b>
<b>APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DO TRÁFEGO DA RODOVIA BR-290/RS.....</b>	<b>172</b>
<b>APÊNDICE D – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DOS ENSAIOS ACELERADOS.....</b>	<b>174</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Simulador de tráfego de laboratório tipo LCPC da USP/SP (Bernucci et al., 2006).	33
Figura 2: Simulador de tráfego de laboratório tipo APA (Fritzen, 2005).	34
Figura 3: Simulador de tráfego circular do LCPC na França (Corté, 2001, apud Rohde, 2007).	36
Figura 4: Vista Superior do simulador de tráfego circular do IPR/DNER (Silva, 2001).	37
Figura 5: Simulador ALF do FHWA (FHWA, 2006).	40
Figura 6: Área de testes de pavimentos do CEDEX (TRB, 2006, apud Rohde, 2007).	41
Figura 7: Simulador de tráfego linear do TRL (TRB, 2006, apud Rohde, 2007).	41
Figura 8: Simulador de Tráfego da UFRGS-DAER/RS (Azambuja, 2004).	42
Figura 9: Simulador de tráfego móvel, modelo HVS (Heavy Vehicle Simulator), desenvolvido em uma cooperação entre a Suécia e a Finlândia (E-CORE, 2008).	46
Figura 10: Localização do trecho da rodovia no qual está situado a estrutura de pavimento a ser analisada nesta pesquisa.	50
Figura 11: Rodovia BR-290/RS, trecho entre Osório e Porto Alegre, em 1973, ano de inauguração (Concepa, 2007).	51
Figura 12: Vista geral atual da Rodovia BR-290/RS (Concepa, 2007).	52
Figura 13: Configuração da pista e das faixas de rolamento da rodovia BR-290/RS desde a sua construção.	54
Figura 14: Estrutura de pavimento a ser considerada nesta pesquisa.	56
Figura 15: Faixa granulométrica da brita graduada utilizada como base na estrutura de pavimento em análise.	59
Figura 16: Vista do km 5 da rodovia BR-290/RS, local do ensaio com o simulador de tráfego	62
Figura 17: Fotos da execução da ampliação da rodovia BR-290/RS.	63
Figura 18: Detalhe da seção transversal da ampliação da rodovia no km 5 da BR-290/RS, pista sentido Osório – Porto Alegre.	64
Figura 19: Ilustração da posição na pista da Seção Teste 1 e Seção Teste 2 ensaiadas no km 5 da rodovia BR-290/RS.	65
Figura 20: Exemplo do processo de degradação esperado com os ensaios na Seção Teste 1 e Seção Teste 2.	66

Figura 21: Condições do trecho da rodovia após os ensaios acelerados. ....	67
Figura 22: Simulador de tráfego tipo HVS empregado na pesquisa. ....	69
Figura 23: Detalhe do guiamento do simulador de tráfego. ....	69
Figura 24: Detalhe da unidade hidráulica do simulador de tráfego. ....	70
Figura 25: Detalhe do manômetro de aplicação de carga do simulador de tráfego. ....	71
Figura 26: Detalhe do elemento mecânico responsável pelo deslocamento transversal do simulador de tráfego. ....	72
Figura 27: Detalhe dos sensores que controlam o deslocamento transversal do simulador de tráfego. ....	72
Figura 28: Detalhe do elemento de amortecimento do simulador de tráfego. ....	73
Figura 29: Detalhe do sistema de acionamento do simulador de tráfego. ....	73
Figura 30: Detalhe dos sensores indutivos do simulador de tráfego. ....	74
Figura 31: Detalhe do painel de controle do simulador de tráfego. ....	74
Figura 32: Detalhe do sistema de rodado do simulador de tráfego. ....	75
Figura 33: Detalhe do sistema de emergência do simulador de tráfego. ....	76
Figura 34: Detalhe de um dos tanques de água do simulador de tráfego. ....	76
Figura 35: Detalhe de um dos espargidores de água que simulam as precipitações pluviométricas no simulador de tráfego. ....	77
Figura 36: Detalhe do engate do simulador de tráfego a um cavalo mecânico. ....	77
Figura 37: Detalhe do simulador de tráfego sendo deslocado pelo cavalo mecânico. ....	78
Figura 38: Calibração da carga a ser aplicada pelo rodado com o uso de uma célula de carga (em detalhe a leitura da célula de carga). ....	79
Figura 39: Distribuição transversal de carga. ....	81
Figura 40: Seções levantadas no ensaio com o simulador. ....	82
Figura 41: Viga Benkelman e Deflectógrafo Digital utilizados na pesquisa com o simulador de tráfego. ....	82
Figura 42: Demarcação das trincas nas seções ensaiadas pelo simulador de tráfego nesta pesquisa. ....	84
Figura 43: Grade metálica auxiliando na transposição das trincas para papel milimetrado e, posteriormente, para via digital. ....	85

Figura 44: Exemplo de medida do afundamento de trilha de roda sendo realizada neste experimento. ....	86
Figura 45: Treliça metálica utilizada para determinação do afundamento de trilha de roda (DNIT 006/2003-PRO).....	86
Figura 46: Extração de corpos-de-prova no trecho ensaiado pelo simulador de tráfego na rodovia BR-290/RS.....	87
Figura 47: Esquema da extração de corpos-de-prova no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego.....	88
Figura 48: Esquema da segmentação dos corpos-de-prova extraídos para a realização de ensaios laboratoriais.....	89
Figura 49: Poços de inspeção abertos nos locais dos ensaios acelerados.....	89
Figura 50: Equipamento utilizado para determinação de resistência a tração por compressão diametral das amostras deste estudo. ....	90
Figura 51: Estado de tensões gerado no ensaio de resistência a tração por compressão diametral (Specht, 2004).....	91
Figura 52: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da UFRGS utilizado para determinação do módulo de resiliência (Brito, 2006).....	92
Figura 53: Detalhe do sistema de carregamento do equipamento utilizado para determinação do módulo de resiliência (Specht, 2004). ....	92
Figura 54: Tempo do pulso de carga em função da velocidade da aplicação da carga obtidos por Barksdale (1971) e Medina e Motta (1995) (resultados sobrepostos por Brito, 2006). ....	94
Figura 55: Pulso de tensão em ensaios com o simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS (Brito, 2006).....	95
Figura 56: Pulso de carga semi-seno-verso, típico em ensaios de módulo de resiliência (adaptado de NCHRP-285).....	96
Figura 57: Formas de pulso de carga possíveis nos ensaios com período de carregamento de 0,2s (Brito, 2006).....	97
Figura 58: Procedimento considerado para a correção das deflexões do pavimento em função da temperatura.....	98
Figura 59: Equipamento utilizado para os ensaios de fadiga desta pesquisa. ....	99
Figura 60: Quadro com a matriz experimental dos ensaios laboratoriais desta pesquisa.....	100
Figura 61: Correção das deflexões em função da temperatura.....	103
Figura 62: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman.....	104
Figura 63: Evolução das deflexões máximas obtidas com o Deflectógrafo Digital.....	104

Figura 64: Evolução das bacias de deflexões obtidas com o Deflectógrafo Digital para a Seção Teste 1.....	106
Figura 65: Evolução das bacias de deflexões obtidas com o Deflectógrafo Digital para a Seção Teste 2.....	106
Figura 66: Evolução das trincas no pavimento da Seção Teste 1 do 1º ao 5º levantamento..	108
Figura 67: Evolução das trincas no pavimento da Seção Teste 2 do 3º ao 7º levantamento..	109
Figura 68: Seção Teste 2, com a demarcação das trincas, após os ensaios com o simulador de tráfego estarem encerrados. ....	110
Figura 69: Evolução das trincas superficiais nos ensaios da Seção Teste 1 e 2.....	111
Figura 70: Comparativo da evolução das trincas superficiais nos ensaios da Seção Teste 1 e Seção Teste 2. ....	112
Figura 71: Evolução dos afundamentos de trilha de roda nos ensaios da Seção Teste 1 e 2.	113
Figura 72: Temperatura média do ar durante o período de ensaios.....	114
Figura 73: Precipitação pluviométrica durante o período de ensaios.....	115
Figura 74: Quadro resumo das quatro condições finais do local da rodovia em que foi ensaiado o pavimento com o simulador de tráfego.....	116
Figura 75: Seqüência das condições do pavimento após os ensaios acelerados considerando os resultados obtidos. ....	117
Figura 76: A superfície dos pavimentos da Seção Teste 1 e 2 antes e após os ensaios com o simulador. ....	118
Figura 77: Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova extraídos das quatro condições finais da pista ensaiada. ....	122
Figura 78: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com pulso de carga de 0,1s dos corpos-de-prova extraídos das quatro condições finais da pista ensaiada. ....	122
Figura 79: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com pulso de carga de 0,2s dos corpos-de-prova extraídos das quatro condições finais da pista ensaiada com o simulador de tráfego. ....	124
Figura 80: Variação do módulo de resiliência em função do tempo do pulso de carga para as quatro condições finais da pista ensaiada com o simulador de tráfego. ....	124
Figura 81: Estimativa da variação do módulo de resiliência em função da velocidade do veículo que exerce as cargas sobre o pavimento. ....	125
Figura 82: Variação do módulo de resiliência em função da temperatura dos ensaios.....	126
Figura 83: Modelos de fadiga em função da tensão de tração.....	128

Figura 84: Modelos de fadiga em função da diferença de tensões.....	128
Figura 85: Verificação do número de ciclos do simulador no término da vida de serviço do pavimento para a Seção Teste 1 e 2 dos ensaios acelerados.....	132
Figura 86: Evolução das deflexões do pavimento obtidas com a Viga Benkelman em função do tráfego real, a partir dos resultados dos ensaios acelerados.....	139
Figura 87: Evolução das deflexões do pavimento obtidas com o Deflectógrafo Digital em função do tráfego real, a partir dos resultados dos ensaios acelerados.....	140
Figura 88: Comparação da curva de tendência para deflexões desenvolvida a partir dos ensaios acelerados com a proposta, para a mesma estrutura, por Vitorello (2008).....	141
Figura 89: Evolução do trincamento em função do tráfego real, a partir dos resultados dos ensaios acelerados.....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das principais pesquisas desenvolvidas com o Simulador de Tráfego IPR/DNER. ....	39
Tabela 2: Resumo das características dos ligantes empregados na camada de revestimento asfáltico da estrutura em estudo (Concepa, 2007). ....	57
Tabela 3: Distribuição granulométrica dos agregados e da mistura empregada na camada de revestimento asfáltico desta pesquisa (Concepa, 2007). ....	57
Tabela 4: Características dos materiais pétreos basálticos utilizados nesta pesquisa (Casagrande, 2003; Rohde, 2007). ....	58
Tabela 5: Resumo das características das misturas de concreto asfáltico consideradas nesta pesquisa (Concepa, 2007). ....	58
Tabela 6: Distribuição granulométrica da areia utilizada como reforço do subleito da estrutura estudada (Concepa, 2007). ....	60
Tabela 7: Condições iniciais das duas seções-testes avaliadas. ....	66
Tabela 8: Resumo dos levantamentos realizados. ....	102
Tabela 9: Convenção de cores da marcação das trincas no pavimento para a Seção Teste 1 e Seção Teste 2. ....	107
Tabela 10: Resultado dos volumes de vazios das amostras extraídas e os ensaios para as quais foram designadas. ....	120
Tabela 11: Constantes dos modelos de fadiga gerados neste trabalho e em estudos anteriores (Specht, 2004; Rohde, 2007). ....	130
Tabela 12: Características das camadas do pavimento consideradas na análise mecânica de tensão-deformação. ....	135
Tabela 13: Resultados da análise mecânica de tensão-deformação. ....	135

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ANFAVEA: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

APA: Analisador de Pavimento Asfáltico

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CENPES: Centro de Pesquisas da Petrobras

CNT: Confederação Nacional do Transporte.

DAER-RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Estado do Rio Grande do Sul

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

*FEC*: Fator de Equivalência de Carga

$F_{\text{velocidade}}$ : fator de relação da velocidade da aplicação da carga

GEIPOT: Grupo de Estudos de Integração da Política de Transportes

*HVS: Heavy Vehicle Simulator*

IPR: Instituto de Pesquisa Rodoviária

*LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Mr: Módulo de resiliência

$N_{\text{AASHTO}}$ : número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO

$n_{\text{simulador}}$ : número de ciclos do simulador de tráfego

$N_{\text{tráfego real}}$ : número de ciclos do tráfego real

$n_{\text{simulador}}^v$  = vida de fadiga para solicitações à velocidade do simulador de tráfego desta pesquisa (8km/h).

$N_{\text{tráfego real}}^v$  = vida de fadiga para solicitações à velocidade do tráfego real (80km/h);

PER: Programa de Exploração da Rodovia

Rt: Resistência à tração

s: segundos

t: toneladas

tf: tonelada força

USP: Universidade de São Paulo

## 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 exportação ou importação – 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 rodoviário, ferroviário, aeroviário e hidroviário. Em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, como o Brasil, tanto para os deslocamentos de cargas como para os de passageiros, o meio de transporte mais adotado é o rodoviário. No Brasil, particularmente, em relação ao transporte de carga, por exemplo, mais de 60% da carga transportada é pelo modal rodoviário, conforme Anuário Estatístico dos Transportes de 2001 (GEIPOT, 2001). 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, período em que muitos recursos foram destinados ao desenvolvimento do modal rodoviário. Em 1956, durante o governo de Juscelino Kubitschek (1956-1961) foi implantada a indústria automobilística, impulsionando o meio rodoviário no país. Na mesma época, entrou em funcionamento a Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras, fábrica de asfalto com capacidade de produção de 116.000t/ano (Bernucci *et al.*, 2007). No chamado "milagre econômico", período que ficou caracterizado pela administração do presidente Emílio Garrastazu Médici (1969-1974), houve grandes investimentos na implementação da indústria, entre elas a automobilística, e na infraestrutura rodoviária, deixando marginalizados de vez os outros modais. Nesse período foram construídas muitas das principais rodovias brasileiras, como a Rodovia Transamazônica e a ponte Rio-Niterói. No entanto, nas últimas décadas, os investimentos na infra-estrutura rodoviária foram ficando escassos, não acompanhando as evoluções da indústria

automobilística, impulsionada, principalmente nos últimos anos, pelas instalações de montadoras e investimentos internacionais.

O problema da pouca atenção dada nas últimas décadas para a infra-estrutura rodoviária é acentuado pelo fato de grande parte das rodovias pavimentadas existentes terem sido construídas em uma época em que, até mesmo pelos critérios de projetos adotados nesse período, pouca atenção e estudos eram dados à qualidade dos materiais constituintes do pavimento, bem como à estrutura projetada. Tal fato colabora para as péssimas condições de conservação das rodovias brasileiras na atualidade. De acordo com recente pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2007), 73,9% das rodovias encontram-se em Estado regular, ruim e péssimo. Considerando-se apenas aspectos relacionados às condições dos pavimentos, 54,5% das rodovias apresentam-se em Estado não satisfatório, necessitando imediatos investimentos de restauração e até reconstrução. No Estado do Rio Grande do Sul, em particular, onde foram avaliados 7.540km de rodovias, 31,3% dos pavimentos encontram-se em condições não satisfatórias. Essas condições, muitas vezes geradas por projetos não adequados, são agravadas principalmente pelo tráfego de veículos comerciais pesados, diversas vezes com excesso de carga devido à falta de fiscalização, e às desfavoráveis condições climáticas.

Colaborando com a degradação dos pavimentos das rodovias do Brasil também está o acentuado crescimento do tráfego verificado nos últimos anos. Atualmente, o Brasil possui uma das maiores frotas de veículos automotores do mundo. De acordo com o Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira da ANFAVEA (Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores, 2007), no ano de 2005 o Brasil possuía uma frota de 23.023.000 veículos automotores, ocupando a décima colocação no *ranking* mundial e representando 2,6% da frota total de veículos automotores do mundo. A fabricação de autoveículos no Brasil também tem crescido, com a produção, em 2006, de 2,6 milhões de veículos. Em 1999, esse número era de 1,4 milhões. O Brasil atualmente sustenta a oitava colocação no ranking mundial de fabricação de veículos automotores.

Diante desse cenário, os administradores rodoviários, governos ou concessionárias, têm que realizar investimentos cada vez maiores, tanto na construção de pavimentos novos, como na recuperação de trechos que necessitem de uma imediata intervenção, com o intuito de encontrar soluções que contemplem pavimentos mais resistentes, mais duráveis e que demandem pequenas manutenções ao longo do período para os quais foram projetados,

assegurando, durante a sua vida de serviço, conforto e segurança aos usuários. Para tanto, tecnologias inovadoras de materiais e procedimentos empregados na pavimentação rodoviária têm sido desenvolvidas, incentivadas no Brasil principalmente pelos programas de concessões rodoviárias, iniciadas na década de 1990 pelos governos federais e estaduais como alternativa para a escassez de recursos para o setor rodoviário.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A rodovia BR-290/RS é uma das principais vias de acesso à capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, sendo, portanto, considerada uma das mais importantes rodovias da região. O trecho entre as cidades de Osório, no litoral gaúcho, e Porto Alegre foi construído em 1973 e está, desde 1997, sob concessão da Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – Concepa. Dentre as principais melhorias realizadas pela concessionária está a obra de ampliação da pista, com o alargamento da plataforma de tráfego. Essa nova estrutura de ampliação está sendo executada, com pequenas distinções quanto às espessuras e materiais das camadas, em toda a extensão entre as cidades de Osório e Porto Alegre, totalizando 96,5km. Assim, há uma necessidade de conhecimento do comportamento do desempenho dessa estrutura de pavimento ao longo de sua vida de serviço, sendo fundamental, para tanto, utilizar procedimentos de avaliação de desempenho que aproximem ao máximo o real comportamento futuro da estrutura.

O fato de a grande maioria dos métodos tradicionais de dimensionamento de pavimentos asfálticos não considerarem de maneira efetiva os mecanismos pelos quais a degradação estrutural se processa é um dos fatores que acarretam as más condições que se encontram as rodovias brasileiras, como comentado anteriormente. Um dos maiores problemas atuais para os engenheiros rodoviários é justamente estimar de forma satisfatória a vida útil da construção de pavimentos novos ou da recuperação de pavimentos deteriorados. Em geral, infelizmente parte-se muito da experiência e do conhecimento heurístico do projetista, com a realização de poucos ensaios laboratoriais. O conhecimento prévio do projetista é importante em muitas definições, mas é necessário também um maior embasamento técnico-científico à solução empregada, obtido através de ensaios laboratoriais, por exemplo, de modo a possibilitar a execução de um eficaz projeto de pavimento.

Quando se utilizam ensaios laboratoriais como aporte para projetos de pavimentação, usualmente são empregados ensaios de módulo de resiliência e, mais raramente, ensaios de fadiga a tensão ou deformação controlada. Os testes em laboratórios, no entanto, muitas vezes não representam fielmente as condições reais às quais os pavimentos executados serão submetidos. Na obtenção e análise dos resultados, muitas considerações são realizadas, adotando-se hipóteses simplificadoras, diminuindo a fidelidade dos ensaios à realidade.

Como procedimento mais moderno, têm sido empregados simuladores de tráfego de laboratório, que ensaiam amostras de revestimento asfáltico submetidas a aplicações de carga que simulam a ação do tráfego sobre o pavimento. No entanto, tais simuladores, assim como a maioria dos procedimentos de dimensionamentos de pavimentos em laboratório, são voltados somente à análise das camadas de revestimento. Tal consideração, embora correta, pois as camadas de revestimentos possuem forte influência no desempenho dos pavimentos e são responsáveis pela maior parcela do valor financeiro investido, inibe a possibilidade de avaliar a estrutura de pavimento como um todo, com todas as camadas trabalhando em conjunto.

Nesse contexto, aumenta-se a necessidade do desenvolvimento de um procedimento mais adequado para avaliação do pavimento e para determinação, com certa precisão, da vida de serviço dos pavimentos.

Atualmente, está se tornando um consenso no meio técnico que a maneira mais próxima de se verificar o desempenho real de pavimentos é através de ensaios acelerados, utilizando-se simuladores de tráfego em escala real. Tal prática já é empregada no Brasil desde a década de 1980, inicialmente com o emprego do simulador de tráfego circular do IPR/DNER (Silva, 2001) e posteriormente com o simulador linear da UFRGS-DAER/RS (Núñez, 1997). Esses equipamentos normalmente ensaiam estruturas-testes, construídas em pistas experimentais, de pequenas dimensões geométricas, executadas exclusivamente para os ensaios com o simulador. A partir dos resultados obtidos, considera-se a possibilidade da adoção dessas estruturas em pavimentos rodoviários reais. Por tratar-se de ensaios inseridos em pesquisas, atenções e cuidados diferenciados no processo de construção da estrutura são seguidos e deixam de representar fielmente a realidade da mão-de-obra do setor rodoviário.

Assim, mesmo os ensaios com simuladores de tráfego em escala real apresentam limitações quanto à representação da realidade. Soluções estruturais que se comportam apresentando

bons resultados, nesses ensaios acelerados, podem não necessariamente ser soluções técnicas adequadas para serem empregadas em rodovias reais.

Para evitar particularidades dos ensaios em pistas experimentais, tem se utilizado em diversos países pelo mundo e, nos últimos anos, no Brasil, simuladores de tráfego móveis, denominados de HVS (*Heavy Vehicle Simulator*), que são deslocados para o local do ensaio, normalmente pistas de pavimentos rodoviários em escala real, em que são executados pequenos trechos experimentais, com dimensões maiores, no entanto, das pistas experimentais. Tais trechos são executados em uma faixa adicional colocada ao lado do pavimento existente ou na própria pista a ser avaliada.

O uso de simuladores de tráfego móveis tem sido, desse modo, considerado o procedimento atual que mais se aproxima da realidade na avaliação do comportamento de uma estrutura de pavimento, embora sabe-se que ainda não são totalmente fiéis ao real desempenho que a estrutura apresentará. O fato de dificilmente representarem por completo as condições climáticas e o tráfego real ao qual a rodovia será submetida, faz com que inevitavelmente haja uma diferença entre o comportamento real e o simulado pelos ensaios acelerados. Em relação ao tráfego real, fatores como o volume das solicitações e a carga exercida sobre o pavimento são difíceis de serem estimados, pois são inúmeras as variáveis sem controle que influenciam tais parâmetros, como, por exemplo, fatores econômicos futuros da região. Também é necessário considerar as variações entre o tráfego real e o equipamento simulador de tráfego quanto à carga (podendo ser superior a da maioria dos veículos que transitam pela rodovia) e à velocidade (normalmente mais baixa que a dos veículos do tráfego real).

O meio rodoviário técnico tem sentido, desse modo, a necessidade do estabelecimento de fatores de relação entre os resultados obtidos com os simuladores de tráfego e o comportamento real que o pavimento apresentará ao longo de sua vida de serviço. Os resultados dos ensaios acelerados com simuladores de tráfego, tanto os fixos (circulares e lineares) quanto os móveis, acabam muitas vezes sendo apenas comparativos, realizando os testes em diferentes estruturas e avaliando o comportamento para cada estrutura de pavimento analisada, verificando a que apresente o melhor desempenho. Esses estudos são válidos e de grande valia, mas permanecem as incertezas de como tal estrutura se comportará quando submetida ao tráfego real.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

A pesquisa descrita nesta dissertação 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 móvel. Nessa avaliação, são realizados levantamentos da variação das condições do pavimento. Através dessa avaliação, é possível estimar a vida de serviço da estrutura adotada, verificando a eficiência da mesma, com o acompanhamento do comportamento do desempenho do pavimento quando submetido ao tráfego real.

Para alcançar o objetivo proposto, também é necessário – e é um dos objetivos da pesquisa – estimar, de forma simplificada, a partir de condições estabelecidas de ensaios, um fator de relação entre os resultados obtidos pelo simulador de tráfego e o desenvolvido pelo tráfego real da rodovia (fator *simulador-tráfego real*).

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes:

- a) Realizar medições periódicas das condições estruturais e funcionais do pavimento ensaiado com o simulador de tráfego através de levantamentos deflectométricos, da densidade de trincamento e do afundamento de trilha de roda, a fim de estimar a evolução de tais parâmetros para cada condição ensaiada da estrutura de pavimento considerada;
- b) Reunir informações dos parâmetros ambientais, tais como temperatura média do ar e precipitações pluviométricas, no intuito de avaliar a influência de tais parâmetros nos resultados obtidos;
- c) Comparar as diferentes condições ensaiadas, considerando-se as variáveis entre cada ensaio;
- d) Realizar uma análise laboratorial sobre amostras de revestimento asfáltico extraídas do local dos ensaios acelerados, tais como a determinação da resistência à tração, do módulo de resiliência e da fadiga da mistura ensaiada, fornecendo ferramentas para auxiliar a análise do desempenho da estrutura de pavimento;

- e) Verificar como se comportam as misturas extraídas de campo solicitadas a diferentes carregamentos do tráfego real e do simulador de tráfego, a partir de ensaios laboratoriais realizados em corpos-de-prova extraídos de diferentes condições (solicitados pelo tráfego real e simulador; solicitados somente pelo tráfego real; solicitados somente pelo simulador; e sem terem sido solicitados a nenhum carregamento);
- f) Avaliar a influência do tempo de aplicação de carga no desempenho dos pavimentos, com a verificação da variação do módulo de resiliência quando submetido a diferentes tempos de pulso de carga e com uma simplificada tentativa de verificar a influência da velocidade do veículo que exerce a solicitação ao pavimento, comparando a velocidade do simulador (8km/h) com a do tráfego real (80km/h);
- g) A partir da evolução dos parâmetros levantados, estimar a tendência de desempenho da estrutura ensaiada.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, descritos a seguir:

O tema da pesquisa é apresentado neste capítulo 1, enfatizando a importância da elaboração de ferramentas e procedimentos que auxiliem na determinação, com uma maior precisão, da vida de serviço dos pavimentos. São levantadas as dificuldades atuais do meio técnico na determinação do real desempenho de pavimentos rodoviários e enfatizada a importância de considerar uma relação entre os resultados obtidos em ensaios acelerados com simuladores de tráfego e o real comportamento dos pavimentos, em particular, neste estudo, para a análise de estrutura da rodovia BR-290/RS.

A seguir, no capítulo 2 descrevem-se os estudos prévios existentes sobre o tema deste trabalho, através de uma revisão bibliográfica a respeito dos simuladores de tráfego e a degradação dos pavimentos asfálticos. São apresentados os principais equipamentos simuladores de tráfego existentes internacionalmente e no cenário nacional, com uma breve descrição também de pesquisas desenvolvidas anteriormente com esses equipamentos.

No capítulo 3 é detalhada a metodologia utilizada nesta dissertação. Neste item, é apresentado o cenário do estudo, descrevendo a rodovia e a estrutura avaliada. São apresentadas as

condições a serem consideradas no estudo. Uma descrição mais detalhada do simulador de tráfego utilizado nesta pesquisa é apresentada. Além disso, são descritos também os levantamentos realizados, expondo a metodologia e os procedimentos adotados em cada um dos levantamentos de campo e de laboratório.

Os resultados desenvolvidos pelo conjunto de ensaios e suas respectivas análises estão apresentados no capítulo 4. Primeiramente são explicitados todos dados reunidos referentes aos levantamentos realizados em campo sobre a estrutura de pavimento em análise. Por fim, são apresentados os resultados laboratoriais obtidos a partir de amostras extraídas de campo.

O capítulo 5 é referente à elaboração de fatores relacionando a ação do simulador e a ação do tráfego real, com a proposta da elaboração de um simplificado fator *simulador-tráfego real*, considerando na análise o efeito da velocidade e da carga de solicitação empregada pelo simulador. A partir dessa relação estimada entre a ação real e a do simulador, é apresentada uma tentativa de extrapolar os resultados obtidos nos ensaios acelerados para o desempenho da estrutura submetida ao tráfego real da rodovia.

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, obtidas após a análise dos resultados, e sua relação com o conhecimento prévio existente na literatura técnica. Em seguida, são sugeridos alguns temas relacionados à presente linha de pesquisa, para que possa ser dada continuidade ao trabalho aqui desenvolvido.

Ainda são apresentados, em apêndices inseridos no final desta dissertação, os resultados da avaliação em campo (apêndice A) e da avaliação em laboratório (apêndice B), informações sobre o tráfego da rodovia (apêndice C), bem como alguns registros fotográficos da pesquisa (apêndice D).

## **2 UMA BREVE REVISÃO SOBRE SIMULADORES DE TRÁFEGO**

As investigações das respostas oferecidas por estruturas observadas em verdadeira grandeza proporcionam significativos avanços na engenharia de pavimentos. O exemplo clássico é a aplicação prática dos resultados obtidos nos ensaios desenvolvidos pela AASHO Road Test, pesquisa desenvolvida nos Estados Unidos, próximo de Ottawa, Illinois, por um período de dois anos, entre outubro de 1958 e novembro de 1960. Na pesquisa, 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 (Gonçalves, 2002).

Até hoje, muitos procedimentos utilizados em projetos de dimensionamento de estruturas de pavimentos em todo o mundo são baseados em resultados experimentais da AASHO Road Test. No entanto, os resultados obtidos neste estudo, na maioria empíricos, referem-se a condições climáticas e de constituição de materiais específicas para as das pistas experimentais de Illinois. Os resultados devem, assim, quando utilizados para estruturas de pavimentos submetidas a diferentes condições, ser cuidadosamente interpretados. No Brasil, especificamente, o clima é bem diferente quando comparado com o da região de Illinois, podendo, portanto, as análises realizadas a partir dos resultados da AASHO Road Test estarem seriamente comprometida. Neste sentido, pesquisadores de diversas partes do mundo vêm se esforçando para definir as suas próprias equações de dimensionamento, bem como de avaliação do comportamento quanto ao desempenho, que permitam levar em conta aspectos fundamentais como características dos materiais e parâmetros climáticos particulares dos locais.

Nos últimos anos, no intuito de avaliar o desempenho de pavimentos em serviço, diversos estudos têm sido realizados 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, Virtaa Test Track, Alberta Research Council e Pista Experimental de Madri. O objetivo comum destas

pesquisas foi possibilitar a obtenção de parâmetros fundamentais, através dos quais se pudesse racionalizar as etapas de projeto e avaliação de pavimentos (Gonçalves, 2002).

As instalações concebidas permitiram 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 (Gonçalves, 2002).

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.

O objetivo principal da realização de ensaios acelerados com o uso de simuladores de tráfego é reproduzir, em um curto espaço de tempo, a degradação que irá ocorrer em um pavimento ao longo de sua vida de serviço para o qual foi projetado. Para ser obtida a degradação acelerada 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 pelo tráfego real da rodovia, considerando-se as cargas definidas como limites pela legislação.

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 recuperação estrutural de pavimentos deteriorados (Gonçalves, 2002).

Os simuladores de tráfego são normalmente empregados em pequenas seções-testes, quando comparadas às dimensões das rodovias, mas com as estruturas em condições de escala real quanto aos materiais, sendo, portanto, considerado o procedimento mais fiel à realidade na elaboração de projetos de pavimentos.

A aplicação acelerada de cargas predefinidas nos ensaios com simuladores de tráfego reduz significativamente o tempo necessário para o desenvolvimento de variações nas condições estruturais e funcionais do pavimento em análise.

Muitos estudos já foram desenvolvidos com a realização de ensaios acelerados através da utilização de simuladores de tráfego em todo o mundo, principalmente na África do Sul, Europa e na América do Norte, regiões de grande desenvolvimento no ramo da pavimentação. No Brasil, nas últimas décadas também tem se acentuado os estudos com simuladores de tráfego na avaliação do comportamento de estruturas de pavimentos rodoviários, com o desenvolvimento de equipamentos e diversas pesquisas a respeito.

Os simuladores de tráfego podem ser divididos em quatro categorias:

- Simuladores de tráfego de laboratório;
- Simuladores de tráfego circulares;
- Simuladores de tráfego lineares;
- Simuladores de tráfego móvel, tipo HVS

## 2.1 SIMULADORES DE TRÁFEGO DE LABORATÓRIO

Os simuladores de tráfego de laboratório (também podendo ser denominados como simuladores de pequeno porte) 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 longo de sua vida de serviço.

Estes ensaios acelerados em laboratório em geral destinam-se ao 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 ser considerados um critério de seleção de dosagem de misturas (Fritzen, 2005).

Os simuladores de laboratório normalmente avaliam apenas a camada de revestimentos e são empregados principalmente para a avaliação dos pavimentos quanto à contribuição do revestimento para as deformações permanentes (afundamento de trilha de roda).

Em recente revisão bibliográfica, Fritzen (2005) apresentou alguns modelos de simuladores de tráfego existentes no mundo. Alguns exemplos de simuladores de laboratório apresentados por Fritzen (2005) são:

- Holanda – Shell: 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 em misturas asfálticas;
- 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, da USP, e o APA, atualmente no laboratório da BR Distribuidora em São José dos Campos.

### 2.1.1 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), da França, no período entre 1968 e 1970. Este simulador tem a finalidade de estudar a contribuição do revestimento para o afundamento de trilha de roda na fase de dosagem das misturas asfálticas. A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) possui um LCPC.

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 das amostras a serem ensaiadas são necessários alguns componentes, como moldes, mesa de compactação, eixo para fixação da roda, sistema de controle, totalizador de ciclos do eixo de compactação, manômetros e válvulas de controle de pressão (Fritzen, 2005).

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, apresentado na figura 1, tem as seguintes características:

- A simulação é realizada sempre com duas amostras por vez;
- Ciclos de 1Hz;
- Pneu 400 x 8, inflado com pressão de 0,6MPa;
- Carga no eixo de 5,0kN;
- Movimentos da roda ao longo do eixo da placa são aplicados no centro da placa por aproximadamente 0,1s;
- Aquecedor até 70°C;
- Painel de controle.

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 (Fritzen, 2005).

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 (Fritzen, 2005).

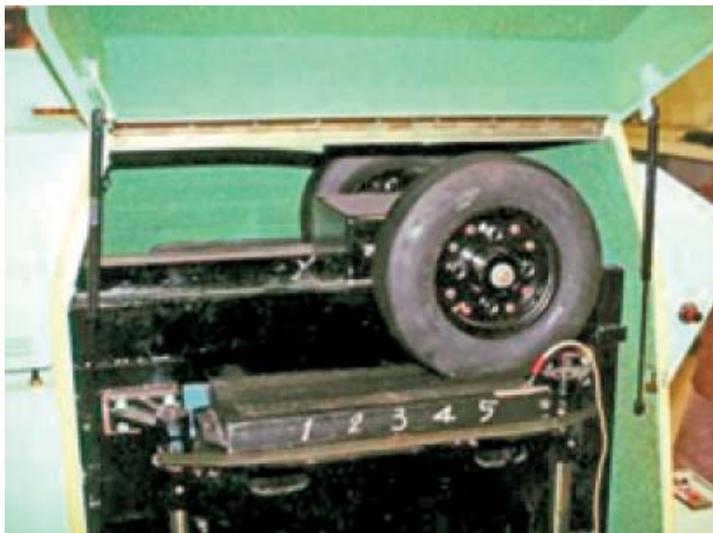


Figura 1: Simulador de tráfego de laboratório tipo LCPC da USP/SP (Bernucci *et al.*, 2006).

A avaliação da medida dos afundamentos de trilha de roda em misturas de concreto asfáltico submetidas a simulador de tráfego LCPC fundamenta-se nas especificações francesas (Fritzen, 2005).

O critério utilizado é o que especifica porcentagem máxima de afundamento em trilha de roda de 10%, após 30.000 ciclos, em relação à espessura da amostra ensaiada para misturas de concreto asfáltico adequadas a camada de revestimento, tendo também como limite o número de ciclos (100.000) e o afundamento máximo (15mm) (Fritzen, 2005).

Merece ser observado que um simulador similar a este da USP (modelo LCPC) está em desenvolvimento no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, na Universidade Federal do Ceará.

### 2.1.2 Analisador de Pavimento Asfáltico – APA

O APA (Analisador de Pavimento Asfáltico ou *Asphalt Pavement Analyzer*) surgiu em 1985, no Departamento de Transporte da Geórgia, nos EUA, com o objetivo de desenvolver um método simplificado de ensaios para a previsão de características de deformação plástica de misturas asfálticas (Fritzen, 2005).

No Brasil, existe um simulador APA, de propriedade da BR Distribuidora. Aspectos deste equipamento podem ser vistos na figura 2. Este simulador tem como principal função verificar o comportamento da mistura asfáltica quanto à deformação permanente, mas pode

também ser usado para avaliar o trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas moldadas a quente e a frio.



Figura 2: Simulador de tráfego de laboratório tipo APA (Fritzen, 2005).

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 (Fritzen, 2005).

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 (Fritzen, 2005).

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 (Fritzen, 2005).

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 (Fritzen, 2005).

## 2.2 SIMULADORES DE TRÁFEGO CIRCULARES

Os simuladores de tráfego circulares exercem as solicitações em pistas circulares. As rodas são localizadas nas extremidades dos braços de equipamentos rotativos. São conhecidos também como simuladores de tráfego radiais.

Os simuladores circulares podem inclusive serem operados no interior de prédios de laboratório quando apresentam dimensões reduzidas (diâmetro até 12m), com o nível do lençol freático e temperaturas controlados. Os simuladores de maior diâmetro funcionam a céu aberto (Núñez, 1997).

O movimento dos simuladores circulares é gerado por motores elétricos, ou elétrico-hidráulicos, atingindo velocidades de até 100km/h. Na maioria dos simuladores, a carga é aplicada através de semi-eixos com diferentes configurações de rodas: simples, duplas e em tandem. O modo de aplicação do carregamento pode ser gravitacional ou hidráulico. As cargas, que podem alcançar valores de 100kN por semi-eixo, são distribuídas transversalmente (Núñez, 1997).

As pistas sobre as quais os simuladores de tráfego circulares exercem suas solicitações são construídas, pelo seu formato (circulares), seguindo alguns procedimentos diferenciados, fato que muitas vezes é considerada uma desvantagem desse tipo de pista.

Alguns exemplos de simuladores de tráfego circulares existentes pelo mundo, de acordo com 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 realizado 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-se lateralmente.
- 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 (figura 3).



Figura 3: Simulador de tráfego circular do LCPC na França (Corté, 2001, *apud* Rohde, 2007).

No Brasil, existe um simulador circular de tráfego: o Simulador IPR/DNER. 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, no km 163 da Rodovia Presidente Dutra, no Rio de Janeiro.

A Pista Circular Experimental do IPR/DNER é constituída por um conjunto de sistemas móveis e de instalações fixas, conforme figura 4.



Figura 4: Vista Superior do simulador de tráfego circular do IPR/DNER (Silva, 2001).

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 regulagem das rodas (Fritzen, 2005).

Silva (2001) descreve o simulador de tráfego do IPR/DNER como tendo um hexágono central da treliça, sob o qual 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.

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 (Fritzen, 2005).

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 (Fritzen, 2005).

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. O equipamento de comando é alojado na sala de controle, construída adjacente à pista de modo a permitir uma visão completa da mesma (Fritzen, 2005).

Embora 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 1.500 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 (Fritzen, 2005).

### 2.2.1 Estudos desenvolvidos com o Simulador de Tráfego IPR/DNER

O Instituto de Pesquisa Rodoviárias – 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

As principais pesquisas desenvolvidas com o simulador circular IPR/DNER estão apresentadas resumidamente na tabela 1.

Tabela 1: Resumo das principais pesquisas desenvolvidas com o Simulador de Tráfego IPR/DNER.

<b>Pesquisa</b>	<b>Período dos ensaios</b>
Prestação de serviços, instalação e montagem da pista	1979 - 1981
Prestação de serviços para operação da pista	1980 - 1982
Operação da pista e pesquisa sobre revestimento TSD e CBUQ	1982 - 1983
Recuperação e/ou atualização do projeto e operação da pista	1987 - 1989
Manutenção de equipamentos e treinamento de pessoal do DNER	1989 - 1991
Operação e pesquisa de revestimento CBUQ c/ diferentes espessuras	1991
Pesquisa sobre Concreto Rolado	1992
Pesquisa sobre Concreto Rolado para tráfego pesado	1993
Pesquisa sobre <i>Whitetopping</i>	1997 - 1998
Asfalto Chileno tipo <i>Multigrade</i>	2002 - 2003

Fonte: Fritzen (2005).

### 2.3 SIMULADORES DE TRÁFEGO LINEARES

Os simuladores de tráfego lineares também possuem, assim como os circulares, grandes dimensões, solicitando pavimentos em escala real. São comumente empregados na avaliação de estruturas de pavimentos.

Os simuladores de tráfego lineares permitem diversas configurações e carga. Motores elétricos acionam um sistema de cabos ou correntes que tracionam o sistema de rodagem. As cargas, transversalmente distribuídas, podem ser aplicadas em um ou dois sentidos. Entretanto, as velocidades são bem menores do que as dos simuladores radiais, raramente ultrapassando os 20km/h. As frequências oscilam entre 200 e 1.800 cargas por hora, transmitidas a uma extensão de pavimento normalmente bem mais curta do que as das pistas circulares (Núñez, 1997).

No mundo, alguns simuladores lineares merecem destaque. No levantamento de Fritzen (2005) são citados os seguintes:

- 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. O ALF é ilustrado na figura 5.



Figura 5: Simulador ALF do FHWA (FHWA, 2006).

Também classificam-se neste grupo, os simuladores da Pista de Testes de Madri (figura 6), onde existem seis seções de ensaios de 25 metros cada, situadas nos trechos retos da pista em formato oval. As seções foram construídas para alguns experimentos com materiais e equipamentos comumente utilizados nas rodovias espanholas. A simulação do tráfego é realizada por dois simuladores de tráfego guiados por uma viga. As características dos simuladores correspondem as de um caminhão com máxima carga legal permitida na Espanha. Os simuladores exercem sobre o pavimento uma carga entre 5,5 e 7,5tf, com uma velocidade de 60km/h. As respostas do pavimento, quando submetido às cargas do tráfego e sua evolução com o tempo, são medidas por instrumentos instalados no pavimento (Rohde, 2007).



Figura 6: Área de testes de pavimentos do CEDEX (TRB, 2006, *apud* Rohde, 2007).

Merece destaque também o simulador de tráfego linear do TRL do Reino Unido, ilustrado na figura 7 (Rohde, 2007).



Figura 7: Simulador de tráfego linear do TRL (TRB, 2006, *apud* Rohde, 2007).

Neste grupo enquadra-se também o segundo simulador instalado no Brasil, que é o da UFRGS, ilustrado na figura 8. O simulador de tráfego da UFRGS-DAER/RS foi construído entre 1992 e 1994. 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 Rio Grande do Sul (DAER/RS) e pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).



Figura 8: Simulador de Tráfego da UFRGS-DAER/RS (Azambuja, 2004).

Para desenvolver o simulador de tráfego da UFRGS-DAER/RS 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 de forma 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 (Ceratti, 1993). 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 (Núñez, 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 Núñez (1997) em sua tese de doutorado.

O simulador de tráfego da UFRGS-DAER/RS está instalado em uma Área de Testes de Pavimentos, no *Campus do Vale* da Universidade. 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 do equipamento.

### 2.3.1 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 Núñez (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 Núñez (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 (Vieira, 2000). Para tanto 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 Vieira (2000) indicaram 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.

Em estudo realizado por Gonçalves (2002), efetuou-se a instrumentação em seis seções experimentais com revestimentos constituídos por misturas de concreto asfáltico convencional e modificados por polímeros. Porém destas seis seções apenas duas foi submetido aos esforços das cargas do tráfego durante este estudo. Estas seções foram monitoradas com medidores de tensões e deformações, instalados em diferentes pontos.

Schmitz (2002) utilizou o simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS para avaliar o comportamento estrutural de um sistema solo – tubo plástico flexível de paredes estruturadas frente a cargas permanentes sobre a tubulação e carregamentos móveis, como os provenientes de tráfego de veículos.

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 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 trincas, Azambuja (2004) realizou um estudo sobre o desempenho de uma estrutura de pavimentos, recapeada em tratamento superficial duplo – TSD, através de ensaios acelerados com a utilização do Simulador de Tráfego linear da UFRGS-DAER/RS.

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, similar 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 a partir dos 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.

Cruz (2005) iniciou um estudo comparando o desempenho de misturas asfálticas formuladas com ligante convencional e ligante modificado por borracha. No estudo, enquanto a seção de pavimento executada com asfalto convencional apresentou um intenso trincamento, a seção com asfalto-borracha no término dos ensaios apresentava somente uma trinca.

Wickboldt (2005), na seqüência do estudo de Cruz (2005), realizou um trabalho em que avaliou através de ensaios acelerados o comportamento de misturas asfálticas modificadas com borracha no processo de retardamento de reflexão de trincas.

Rohde (2007) desenvolveu uma pesquisa com ensaios acelerados em misturas asfálticas com módulos de resiliência elevados (EME). Após 200 mil ciclos do simulador, não foi verificada a ocorrência de trincamento superficial para a estrutura avaliada.

Ainda merecem destaque os estudos realizados por Albano (1998, 1999 e 2005), nos quais se avaliaram os efeitos dos fatores de carga por eixo, pressão de inflação e tipo do pneu no desempenho de pavimentos. Com estas pesquisas, verificou-se que, para 20% de excesso de carga por eixo, houve uma redução da vida útil do pavimento de 48% no pavimento estudado.

## 2.4 SIMULADORES DE TRÁFEGO MÓVEL, TIPO HVS

Os simuladores de tráfego móveis, tipo HVS, são também simuladores de tráfego lineares. No entanto, por apresentarem particularidades, estão, nesta dissertação, considerados em uma categoria específica.

Os simuladores HVS foram desenvolvidos na África do Sul, na década de 1970. É o mais diferente dos demais, e foi montado em uma estrutura sobre rodas, que pode deslocá-lo por meios próprios até o local de testes, realizando o carregamento na pista real. Em geral, 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 figura 9 apresenta um exemplo de simulador HVS desenvolvido em uma cooperação entre a Suécia e a Finlândia.



Figura 9: Simulador de tráfego móvel, modelo HVS (Heavy Vehicle Simulator), desenvolvido em uma cooperação entre a Suécia e a Finlândia (E-CORE, 2008).

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 sua 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 (Horak et al., 1999, *apud* Gonçalves, 2002).

A aplicação das cargas do tráfego pelo HVS normalmente pode ser feita em um único sentido ou nos dois sentidos. A velocidade máxima de deslocamento é de 8 km/h, podendo aplicar até 17.000 repetições de cargas por dia. O comprimento de simulação da solicitação é de 7,5 m e o deslocamento lateral programável de até 1,5 m. Podem ser aplicadas cargas de até 200kN.

De acordo com Horak et al. (1999), na engenharia de pavimentos, nota-se uma ausência 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.

No Brasil, em 2002, a empresa Cifali desenvolveu e patenteou o primeiro simulador de tráfego móvel da América Latina. Nos anos seguintes, a mesma empresa desenvolveu outro equipamento semelhante. Hoje, ambas unidades pertencem à empresa Simular.

### 2.4.1 Estudos desenvolvidos com os Simuladores de Tráfego Móvel – HVS – no Brasil

A primeira unidade do simulador de tráfego móvel, modelo HVS, foi utilizada no início de uma pesquisa do DAER-RS e no estudo realizado na concessionária de rodovias Autovias 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 foi 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 (Johnston, 2006).

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 (AUTOVIAS, 2004, *apud* Fritzen, 2005).

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 Autovias (2004, *apud* Fritzen, 2005) 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.

Fritzen (2005) realizou um trabalho com a construção de quatro trechos experimentais, na Rodovia Rio Teresópolis, com soluções diferentes que foram testadas através de ensaios acelerados com a utilização do simulador de tráfego móvel – HVS. Concluiu-se que as três soluções que empregaram fresagem de parte do revestimento e aplicação de concreto asfáltico convencional, concreto asfáltico com geogrelha e concreto asfáltico com asfalto borracha resistiram ao número de repetições do eixo padrão rodoviário, N, iguais a  $3,6 \times 10^6$ ,  $4,1 \times 10^6$  e  $3,8 \times 10^6$  respectivamente. O quarto trecho, que usou concreto rolado na base e concreto asfáltico após  $4,7 \times 10^6$  ciclos não havia rompido, mas o Simulador foi retirado, não se concluindo o experimento.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CENÁRIO DO EXPERIMENTO

A estrutura de pavimento avaliada nesta dissertação está situada no trecho da rodovia BR-290/RS entre as cidades de Osório e Porto Alegre, segmento conhecido como *Free Way*, que está, desde 1997, sob a administração da Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – Concepa. A figura 10 apresenta um mapa da localização da rodovia analisada.

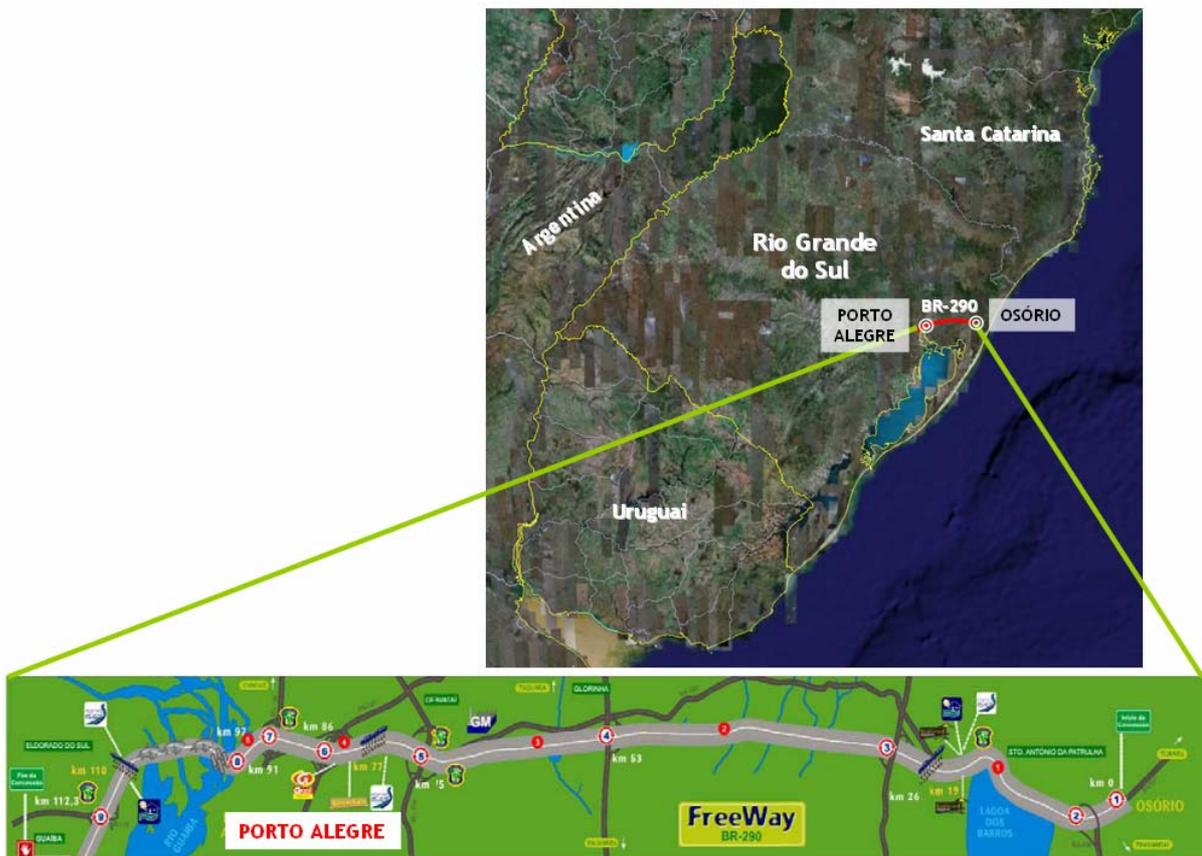


Figura 10: Localização do trecho da rodovia no qual está situada a estrutura de pavimento a ser analisada nesta pesquisa.

### 3.1.1 Características da rodovia BR-290/RS

A BR-290/RS é considerada uma das principais vias do Estado do Rio Grande do Sul, cruzando-o do litoral norte em sentido oeste, até o município de Uruguaiiana, na divisa com a Argentina. A rodovia é uma rota estratégica para o Mercosul e principal acesso a Porto Alegre e região metropolitana.

O trecho entre as cidades de Osório e Porto Alegre da Rodovia BR-290/RS, conhecida como *Free Way*, foi aberto ao tráfego em setembro de 1973. A rodovia nasceu em uma época em que o governo federal estava investindo em grandes obras rodoviárias. A figura 11 apresenta uma imagem da rodovia no ano de sua inauguração.



Figura 11: Rodovia BR-290/RS, trecho entre Osório e Porto Alegre, em 1973, ano de inauguração (Concepa, 2007).

Principal via de acesso às praias do Litoral Norte do Estado, bem como à BR-101, elo de ligação do Rio Grande do Sul com os principais centros comerciais do país, a *Free Way* apresentava características até então muito raras para rodovias brasileiras: pista dupla, com duas faixas e dois acostamentos em cada pista. Era motivo de orgulho para os gaúchos e a expectativa era de que proporcionaria tráfego com conforto e segurança por muitas décadas. Até hoje, a rodovia apresenta um elevado padrão de qualidade, diferenciando-a das demais rodovias do Estado e sendo considerada uma das melhores rodovias do país (Guia 4 Rodas, 2008). O traçado da rodovia encontra-se em um relevo plano, possuindo, em consequência dessa característica, raios amplos. A figura 12 apresenta uma vista geral atual da rodovia BR-290/RS, em seu trecho próximo à cidade de Osório, junto à Lagoa dos Barros.



Figura 12: Vista geral atual da Rodovia BR-290/RS (Concepa, 2007).

Logo após a sua inauguração, foi iniciada a cobrança de pedágios na rodovia. Contudo, em seguida o pavimento passou a apresentar defeitos que explicitavam que a sua condição estrutural estava seriamente comprometida, com a decorrente piora da condição funcional.

A procura de uma explicação para o precoce insucesso, que desafiava o conhecimento sobre o comportamento de pavimentos existente à época no país, motivou a celebração de um convênio entre o DNER e a Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Através desse Convênio foram realizados estudos de campo e laboratório que permitiram identificar que o solo residual de arenito, empregado na sub-base do pavimento, tinha um comportamento deficiente em termos de deformabilidade elástica; e que sua posição, subjacente a uma base de brita graduada tratada com cimento (BGTC), originava elevadas tensões de tração na base rígida, que, por isso, trincara precocemente (Preussler, 1978). Essa análise foi exposta, em 1978, na dissertação de Mestrado do Eng<sup>o</sup> Ernesto Simões Preussler, que realizou pela primeira vez no país um estudo de deformabilidade elástica de solos, empregando o equipamento para ensaios de cargas repetidas, montado na COPPE/UFRJ.

Devido, em grande parte, a essa característica resiliente das camadas inferiores do pavimento da rodovia BR-290/RS, as soluções de restauração, apresentadas em projetos elaborados ao longo das décadas de 1980 e 1990, não tiveram êxito. Em diversos trechos, a capacidade estrutural, que se acreditava recuperada através de recapeamentos, prontamente dava sinais de redução, e os defeitos voltavam a manifestar-se.

Em 1989, a cobrança de pedágio na rodovia foi paralisada. Nesse período, o Governo Federal não possuía verba financeira para investir em suas rodovias para efetuar os necessários serviços de manutenção e reparos. A única saída encontrada para esse impasse foi realizar um programa de concessões. Assim, com essa dificuldade do Governo Federal em dispor de recursos para a manutenção da malha rodoviária brasileira, de um modo geral, foi criado em 1994 o primeiro Programa de Concessão Rodoviária do Brasil, no qual a rodovia BR-290/RS foi incluída (PER, 1994), com a concessão à iniciativa privada do trecho entre Osório, no km 0, e Eldorado do Sul, no km 112, interceptando o acesso a Porto Alegre, no km 96,5. Nesse contexto, as construtoras Triunfo e SBS criaram em 1997 oficialmente a empresa Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A – Concepa com o objetivo exclusivo de administrar esse trecho da rodovia BR-290/RS.

Com o início da concessão, passou-se a realizar novamente a cobrança do pedágio. Atualmente há três praças de cobrança de pedágio nesse trecho: 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.

Em relação à geometria das pistas de rolamento da rodovia BR-290/RS, em 1997, quando a concessionária assumiu a gestão da rodovia, a largura de sua plataforma de rolamento estava inadequada para a capacidade de tráfego ao qual a rodovia era submetida, principalmente no período do verão gaúcho. Antes da concessão, a rodovia entre as cidades de Osório e Porto Alegre possuía uma plataforma com 12m de largura, tendo duas faixas de tráfego em cada sentido, sendo essa a configuração da rodovia desde a sua inauguração, conforme visualizada na Figura 11. Como melhoria em relação à capacidade de tráfego da rodovia, a Concepa imediatamente adotou uma solução provisória acrescentando uma faixa em cada sentido apenas readequando a sinalização horizontal, mantendo a largura de 12m de cada pista. No entanto,

para garantir soluções definitivas em relação à segurança e ao conforto ao rolamento, a concessionária está, desde o início de sua concessão, ampliando a plataforma de tráfego das pistas, aumentando em 4,25m a sua largura, sendo essa uma das principais obras a serem realizadas pela concessionária ao longo de seu período de concessão. Em sua configuração final, a plataforma de tráfego terá 16,25m de largura, distribuída em três faixas com 3,75m, com acostamento externo de 3m e acostamento interno de 2m. A figura 13 apresenta esquematicamente as configurações da pista e das faixas de tráfego existentes desde a construção da rodovia.

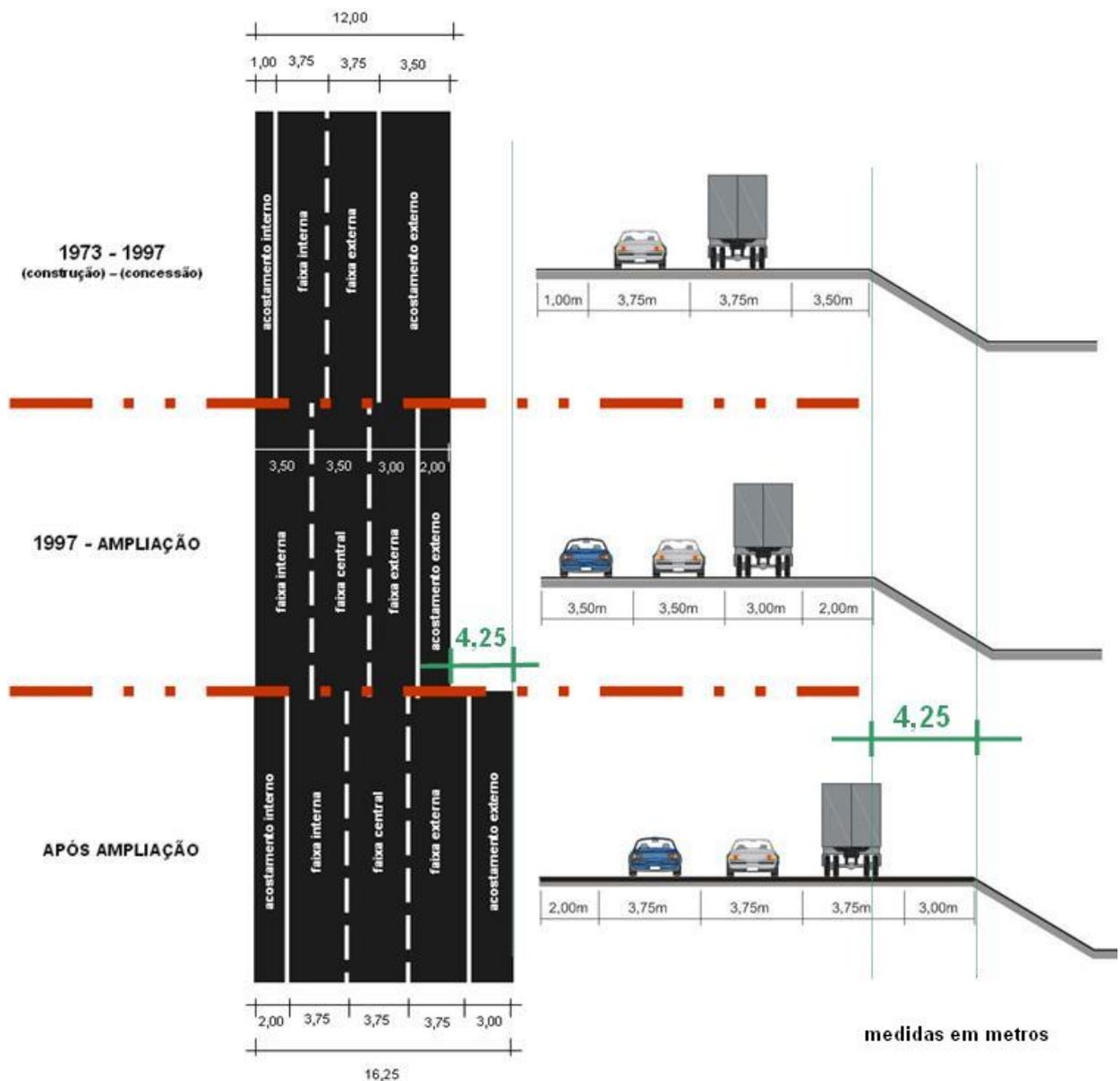


Figura 13: Configuração da pista e das faixas de rolamento da rodovia BR-290/RS desde a sua construção.

Até o início do ano de 2008, a rodovia já estava com a ampliação concluída em toda a pista sentido Osório – Porto Alegre e em parte da pista no sentido Porto Alegre – Osório (entre os km 96,5 e 70 e entre os km 37 e 24). De acordo com a Revisão do Programa de Exploração da Rodovia (PER, 2005), a concessionária tem como previsão a conclusão das obras de ampliação para o biênio 2010/2011.

Em relação ao volume de tráfego, a rodovia, por ser uma rodovia sazonal (intenso fluxo de veículos no período do verão, por ser via de acesso ao litoral do Estado), apresenta um VDM variável ao longo do ano, sendo próximo a 20 mil veículos nos meses de inverno e superior a 35 mil veículos nos meses de verão. Considerando-se apenas o tráfego de veículos comerciais, a sazonalidade não é representativa, possuindo a rodovia um VDM para tráfego comercial aproximadamente de 1.900 veículos.

### 3.1.2 Definição da estrutura avaliada

Por ser uma estrutura com perfil conhecido até as 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.

A estrutura de ampliação típica adotada na rodovia, e a ser utilizada neste estudo, contempla em 60cm de espessura de areia, como reforço do subleito local, 30cm de espessura de sub-base de material originado do britador primário, 15cm de espessura de base de brita graduada e 8cm de espessura de revestimento com CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), conforme figura 14.

Embora não houvesse maiores detalhes do projeto de dimensionamento desta estrutura, foi informado que os projetos efetuados no início da concessão possuíam um  $N_{AASHTO}$  de projeto da ordem de  $1,8 \times 10^7$  (para um período de projeto de 10 anos).

Os materiais pétreos empregados nas camadas de revestimento, de base e de sub-base são rochas basálticas básicas, extraídas de jazida localizada no município de Santo Antônio da Patrulha, RS, próxima do km 30 da rodovia BR-290/RS. O derrame basáltico cobre, aproximadamente, 54% do território do Estado do Rio Grande do Sul (ABGE, 1998).

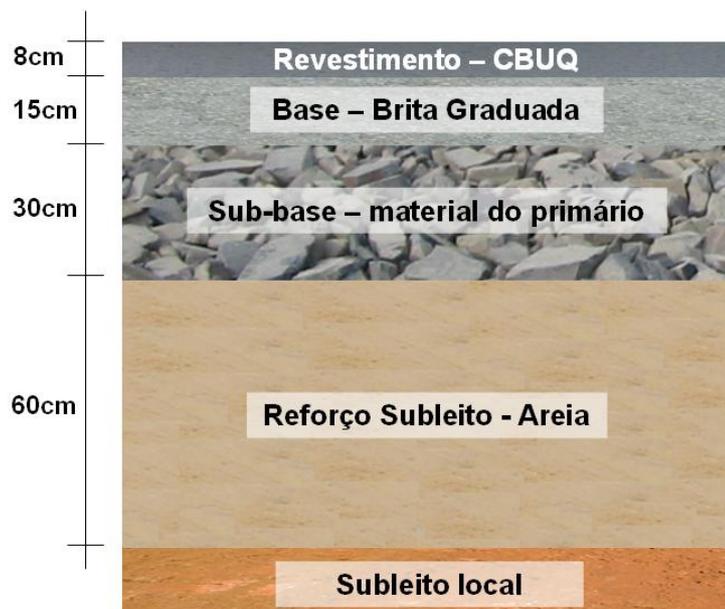


Figura 14: Estrutura de pavimento a ser considerada nesta pesquisa.

Os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas mais abundantes ocorrendo principalmente na forma de derrames. No Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde totalizam mais de 90% das rochas vulcânicas existentes. A mineralogia essencial é plagioclásio cálcico (labradorita) (35-50%), augita (20-40%), magnetita ou ilemita (5-15%) e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. A textura é afanítica, micro granular, por vezes amigdaloidal (ABGE, 1998, *apud* Rohde, 2007).

Os materiais pétreos empregados neste trabalho foram estudados anteriormente em outras pesquisas (Casagrande, 2003; Rohde, 2007).

### 3.1.2.1 Revestimento asfáltico

A camada de revestimento asfáltico de 8cm de espessura foi executada em duas camadas de 4cm. A camada inferior foi executada com asfalto convencional, utilizando CAP 50 – 70 da Refinaria Alberto Pasqualini - REFAP S/A, Canoas, RS. A camada superior, por sua vez, é constituída de asfalto-borracha, utilizando o ligante modificado da Petrobras. A tabela 2 destaca o resumo das principais propriedades dos ligantes adotados. As características apresentadas foram obtidas de ensaios efetuados em amostras de ligante no período em que a pista a ser ensaiada pelo simulador foi construída.

Tabela 2: Resumo das características dos ligantes empregados na camada de revestimento asfáltico da estrutura em estudo (Concepa, 2007).

característica	unidade	CAP 50 - 70	ligante modificado com borracha
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	55	58
Ponto de amolecimento	°C	48	62
Ponto de fulgor	°C	245	245
Recuperação elástica por torção	%	-	62

Em ambas as misturas, a faixa granulométrica utilizada foi a Faixa IV-B do Instituto do Asfalto, por ser a faixa adotada pela concessionária que administra a rodovia BR-290/RS, trecho entre as cidades de Osório e Porto Alegre, em suas obras de pavimentação. Para a formulação das composições granulométricas das misturas asfálticas foi necessário utilizar areia e pó calcário. A tabela 3 apresenta as médias das granulometrias dos agregados utilizados nesta pesquisa e da mistura granulométrica das misturas. A tabela 4, por sua vez, apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais pétreos basálticos utilizados e a tabela 5 destaca o resumo das características de projeto das duas misturas.

Tabela 3: Distribuição granulométrica dos agregados e da mistura empregada na camada de revestimento asfáltico desta pesquisa (Concepa, 2007).

Peneiras		Passante (%)					MISTURA
nº	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra	Areia	Cal	
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
1/2"	12,7	72,9	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>93,0</b>
3/8"	9,5	45,2	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>85,8</b>
4	4,76	1,6	20,9	93,4	100,0	100,0	<b>59,8</b>
8	2,38	0,8	8,1	63,5	97,7	100,0	<b>41,9</b>
30	0,59	0,5	0,9	29,1	78,0	100,0	<b>21,8</b>
50	0,297	0,4	0,9	19,6	36,1	99,6	<b>15,1</b>
100	0,149	0,4	0,9	12,8	1,2	82,4	<b>9,5</b>
200	0,074	0,3	0,7	8,3	0,5	54,4	<b>6,2</b>

Tabela 4: Características dos materiais pétreos basálticos utilizados nesta pesquisa (Casagrande, 2003; Rohde, 2007).

Índice de lamelaridade (%)	30
Absorção (%)	0,79
Massa específica Real (kN/m <sup>3</sup> )	28,03
Massa específica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	27,42
Massa específica Efetiva (kN/m <sup>3</sup> )	27,73
Sanidade (%)	6,7
Equivalente de areia (%)	73,8
Perda por abrasão (%)	16

Tabela 5: Resumo das características das misturas de concreto asfáltico consideradas nesta pesquisa (Concepa, 2007).

<b>característica</b>	<b>mistura com asfalto convencional</b>	<b>mistura com asfalto-borracha</b>
Teor de ligante (%)	5,8	6,2
Massa Específica Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	25,1	24,8
Massa Específica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	24,2	23,8
Volume de Vazios (%)	3,8	4,1
Vazios Agregado Mineral (%)	17,6	18,5
Relação Betume-Vazios (%)	78,2	77,8
Estabilidade (kgf)	1.060,0	1.020,0
Fluência (mm)	3,9	4,4

### 3.1.2.2 Camada de base

A camada de base da estrutura ensaiada, com 15cm de espessura, é constituída de base de brita graduada, estando a granulometria próxima ao centro da Faixa A do DNER (1997). A figura 15 apresenta a faixa granulométrica da brita graduada utilizada como base no pavimento em estudo, bem como os limites da Faixa A do DNER.

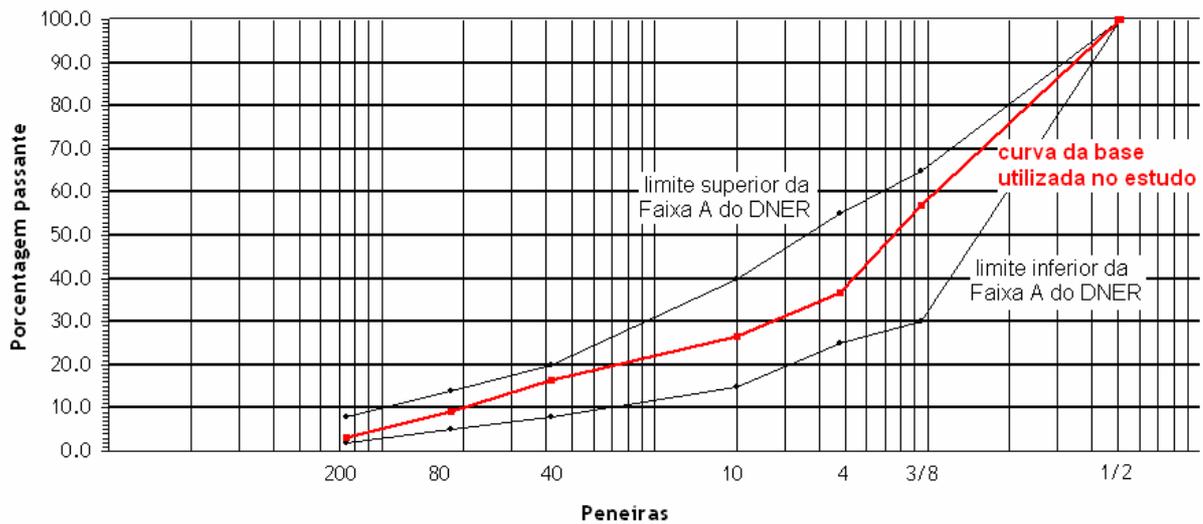


Figura 15: Faixa granulométrica da brita graduada utilizada como base na estrutura de pavimento em análise.

Casagrande (2003) estudou a brita graduada utilizada nesta pesquisa, obtendo a variação do módulo de resiliência do material em função da soma das tensões principais ( $\theta$ ), apresentada na equação 1.

$$MR = 628.\theta^{0.65} \quad (\text{equação 1})$$

onde:  $MR$  = módulo de resiliência da camada de brita graduada (MPa);

$\theta$  = soma das tensões principais;

### 3.1.2.3 Camada de sub-base

Na camada de sub-base, empregou-se o agregado obtido do primário no processo de britagem, com diâmetro máximo de 100mm. Na execução, realizou-se o bloqueio dessa camada com pedrisco, preenchendo os vazios, sendo esta uma técnica comum em obras rodoviárias.

### 3.1.2.4 Camada de reforço de subleito

Adotou-se, como reforço do subleito local da estrutura de pavimento em estudo, uma camada de 60cm de areia. A areia utilizada, de origem litorânea, foi obtida de jazida localizada próxima da cidade de Osório. A tabela 6 apresenta a distribuição granulométrica da areia empregada como reforço de subleito.

Tabela 6: Distribuição granulométrica da areia utilizada como reforço do subleito da estrutura estudada (Concepa, 2007).

<b>Peneiras</b>		<b>Passante (%)</b>
<b>nº</b>	<b>mm</b>	<b>Areia</b>
8	2,38	100,0
30	0,59	99,9
50	0,297	96,2
100	0,149	24,8
200	0,074	1,8

### 3.1.3 Definição do local dos ensaios acelerados

A estrutura definida para ser avaliada com o simulador de tráfego – estrutura da ampliação – está sendo executada pela concessionária ao longo de toda a extensão da rodovia entre as cidades de Osório e Porto Alegre, com algumas pequenas particularidades em cada segmento. No entanto, foi preciso, seguindo alguns critérios, definir o local em que o equipamento iria ser posicionado para os ensaios.

O trecho ensaiado foi definido levando-se em consideração alguns critérios:

- segurança: por ser um ensaio realizado sobre a rodovia, com a necessidade de uma faixa ficar bloqueada durante todo o período de ensaio, era importante que o trecho ensaiado fosse em um local sem intenso movimento, evitando-se que a capacidade de tráfego da rodovia fosse prejudicada pelo posicionamento do equipamento; também era importante que a faixa ensaiada fosse a externa (à direita), permitindo, com maior segurança, o bloqueio da faixa, visto ser essa a faixa, na rodovia BR-290/RS, de tráfego pesado, com os veículos trafegando em menores velocidades, limitando, assim, a definição do trecho a ser ensaiado para o segmento entre os km 0 e 70, visto que nos demais locais a ampliação ocorreu junto ao canteiro central, na faixa interna (à esquerda);
- intervenções: seria importante também que não houvesse ocorrido, nesse trecho, intervenções, com remendos, por exemplo, após a execução da obra de ampliação, para ser avaliada a estrutura original de ampliação – e não a estrutura de ampliação com intervenções realizadas;
- período de ensaios: o equipamento simulador de tráfego foi locado pela concessionária pelo período de 3 meses; 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 significativa degradação do pavimento; para garantir essa variação na condição do pavimento (com evolução das trincas, afundamento de trilha de roda e demais características), definiu-se começar os ensaios por um local que já houvesse iniciado o processo de degradação, pois, caso fosse optado pelo posicionamento do equipamento em um local em que não houvesse sido iniciado o processo de trincamento, poderia se correr o risco de, após o período de ensaios, não ser atingido o nível de degradação aguardado, impossibilitando conclusões a respeito da evolução dos parâmetros de desempenho.

De acordo com as condições expostas acima, realizou-se uma série de análises junto às equipes de engenharia, de operação e de segurança da concessionária Concepa, definindo-se por um trecho localizado no km 5 da rodovia, da pista sentido Osório – Porto Alegre, na cidade de Osório. A figura 16 apresenta o local do posicionamento do equipamento simulador

de tráfego no km 5 da rodovia BR-290/RS, inclusive mostrando a faixa externa de tráfego bloqueada para os ensaios.



Figura 16: Vista do km 5 da rodovia BR-290/RS, local do ensaio com o simulador de tráfego.

O trecho em análise foi construído entre os meses de agosto e outubro do ano de 2004, estando desde esse período aberto ao tráfego da rodovia. A figura 17 apresenta um quadro ilustrativo com fotos da construção da ampliação da plataforma da rodovia.

A camada de 8cm de revestimento asfáltico da estrutura de ampliação do local foi executada em duas camadas de 4cm. Na camada inferior, foi empregado concreto asfáltico com ligante convencional (CAP 50/70). A camada superior foi executada, por sua vez, com asfalto-borracha. Embora essa configuração seja tecnicamente discutível (camada com módulo menor sobre camada – pouco espessa – com módulo maior e apenas camada superior executada com ligante tendo característica de retorno elástico, sendo que o mais importante seria tal característica estar na camada inferior, mais solicitada à tração), o fato de se estar trabalhando com revestimento utilizando asfalto-borracha sobre revestimento com asfalto convencional

possibilita abranger os resultados obtidos na pesquisa para uma das condições mais cotidianas da pavimentação da atualidade, de recapeamentos com asfalto-borracha sobre capas antigas, com asfalto convencional. Detalhes da seção de ampliação no local do ensaio são apresentados na figura 18, em que podem ser observados os encaixes da nova estrutura na pista existente.



Figura 17: Fotos da execução da ampliação da rodovia BR-290/RS.

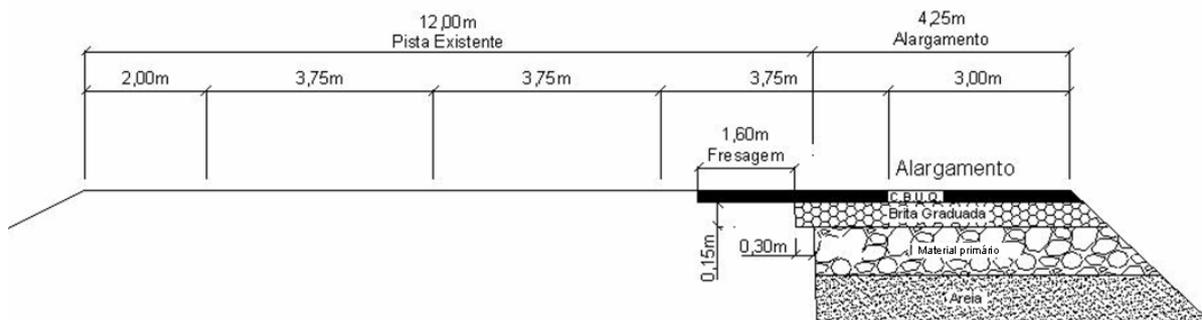


Figura 18: Detalhe da seção transversal da ampliação da rodovia no km 5 da BR-290/RS, pista sentido Osório – Porto Alegre.

### 3.1.4 Condições a serem ensaiadas

Os ensaios acelerados com o simulador de tráfego na estrutura de pavimento da rodovia BR-290/RS foram inicialmente realizados sobre a faixa de tráfego que já estava desde outubro de 2004 sob a ação do tráfego real da rodovia (com elevada concentração de veículos de carga). O revestimento asfáltico desse primeiro ensaio – Seção Teste 1 – já apresentava o processo de degradação iniciado, com trincas na superfície.

Tinha-se como objetivo, nesse primeiro ensaio, avaliar a evolução das condições de desempenho da estrutura de pavimento em análise. O resultado dos ensaios acelerados representou a vida residual da estrutura de pavimento analisada.

A concessionária que administra a rodovia realiza nas praças de pedágio a contagem volumétrica e classificatória do tráfego. A contagem de tráfego é realizada através de sensores automáticos instalados na pista junto das cabines de cobrança de pedágios. Para esta pesquisa, foram adotados os dados de contagem da praça de pedágio de Santo Antônio da Patrulha, no km 19 da rodovia. Em conjunto com a contagem de tráfego, é realizada, através da distância dos eixos, a classificação dos veículos.

Na ausência de dados de pesagem, para estimar o volume de tráfego ocorrido entre o período da construção do trecho em análise e o início dos ensaios acelerados, foi considerado que os veículos trafegam pela rodovia com a carga legal permitida, de acordo com o tipo de eixo dos veículos, que possibilitou obter um fator de equivalência de carga e, em seqüência, um fator de veículo. Considerou-se ainda que 70% dos veículos comerciais trafegam na rodovia BR-290/RS, trecho entre Osório e Porto Alegre, pela faixa externa. Desse modo, a partir dos dados de contagem e classificação fornecidos pela concessionária, de outubro de 2004 até o

início dos ensaios acelerados, o local havia sido solicitado a um  $N_{AASHTO}$  de aproximadamente  $4 \times 10^6$ . Considerando-se os últimos 5 anos, a rodovia apresentou, no trecho em que os ensaios desta pesquisa foram efetuados, um  $N_{AASHTO}$  anual de aproximadamente  $1,5 \times 10^6$ . Destaca-se que ao longo da dissertação será sempre considerado o número equivalente de solicitações da AASHTO por ser esse o adotado pela concessionária que administra a rodovia em seus documentos e tratativas junto ao poder concedente. Os dados referentes ao volume de tráfego considerado neste trabalho estão apresentados no apêndice C.

Após a simulação do primeiro ensaio, o simulador de tráfego foi deslocado para o acostamento da rodovia, no mesmo local, que seria um trecho com idênticas características, mesma idade e mesmo processo construtivo, mas sem ter sido solicitado pelo tráfego real, e, por consequência, sem ter iniciado o processo de degradação – Seção Teste 2. Por ser uma rodovia com três faixas de rolamento largas, a consideração de ser desprezível o tráfego sobre o acostamento é razoável e, como verificado pela concessionária que administra a rodovia, verídica.

Nesse segundo ensaio, tinha-se o objetivo de determinar o momento inicial do processo de degradação do pavimento. Com o prosseguimento dos ensaios, com o período destinado a esses sendo adequado, obteve-se a vida de serviço da estrutura de pavimento.

A figura 19 ilustra as duas condições ensaiadas pelo simulador de tráfego para a presente pesquisa, com a identificação da Seção Teste 1 e da Seção Teste 2.

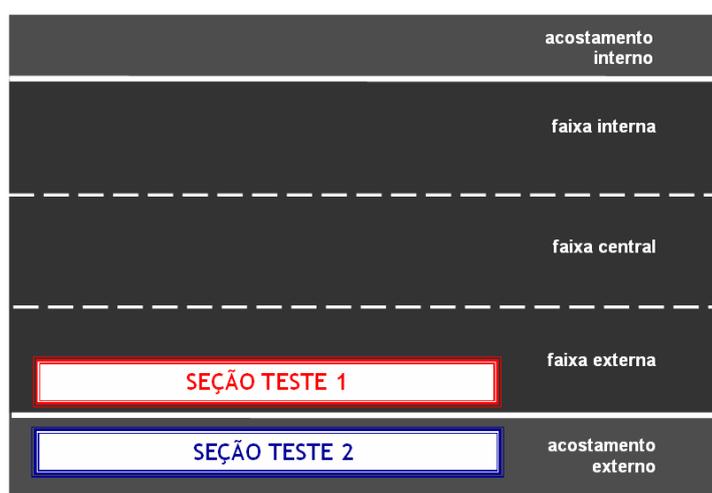


Figura 19: Ilustração da posição na pista da Seção Teste 1 e Seção Teste 2 ensaiadas no km 5 da rodovia BR-290/RS.

Com os ensaios realizados nas duas condições, foi possível acompanhar a evolução completa da degradação 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 20, com o gráfico de uma evolução típica da porcentagem de trincamento.

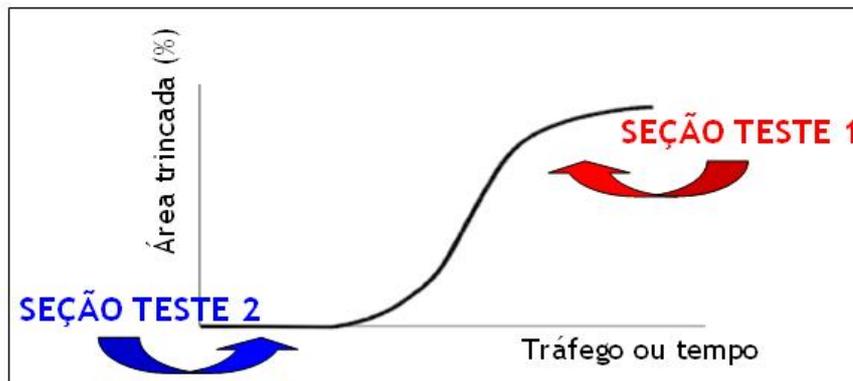


Figura 20: Exemplo do processo de degradação esperado com os ensaios na Seção Teste 1 e Seção Teste 2.

O fato de se estar trabalhando em uma estrutura já solicitada pelo tráfego real possibilitou fazer relações entre a ação ocasionada pelo tráfego real e a simulada pelo equipamento simulador de tráfego, permitindo, através de uma série de considerações, estimar um fator *simulador-tráfego real*

Inicialmente, antes de serem ensaiadas, as duas seções simuladas possuíam as características apresentada na tabela 7.

Tabela 7: Condições iniciais das duas seções-testes avaliadas.

característica / parâmetro	Seção Teste 1	Seção Teste 2
$N_{AASHTO}$	$4,0 \times 10^6$	0
Densidade de trincamento [ $\text{cm}/\text{m}^2$ ]	148	0
Deflexões [ $10^{-2}\text{mm}$ ] (Viga Benkelman)	40	36
Deflexões [ $10^{-2}\text{mm}$ ] (Deflectógrafo Digital)	30	28
Afundamento de trilha de roda [mm]	14,6	0,9

Após os ensaios acelerados com o simulador de tráfego estarem concluídos, o trecho da rodovia ensaiado apresentava as quatro condições ilustradas na figura 21.



Figura 21: Condições do trecho da rodovia após os ensaios acelerados.

Sobre a faixa já trafegada inicialmente pelo tráfego real (faixa externa da rodovia) – Seção Teste 1, havia 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 – Seção Teste 2, também havia a condição ensaiada pelo simulador (ciclos do equipamento) e a condição não ensaiada (não tendo sido solicitada a nenhum ciclo – real ou do simulador).

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

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DO SIMULADOR DE TRÁFEGO EMPREGADO NA PESQUISA

O simulador de tráfego linear móvel, do tipo HVS, utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido e construído pela empresa brasileira Cifali, baseando-se na experiência do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS. Atualmente o equipamento pertence à empresa Simular. A figura 22 apresenta o equipamento simulador de tráfego posicionado sobre a rodovia BR-290/RS para avaliação da estrutura analisada neste estudo.

O simulador de tráfego móvel utilizado na pesquisa (modelo HVS) possui resumidamente as seguintes características na sua configuração:

- Comprimento total do equipamento: 19m;
- Largura total: 3m;
- Altura: 4,5m;
- Peso total: 50t;
- Velocidade: 8km/h;
- Comprimento de simulação máxima: 10,0m;
- Comprimento de simulação útil: 6,0m;
- Largura de simulação máxima: 1,0m;
- Ciclos: 350 ciclos p/h (Sentido Único) ou 700 ciclos p/h (Sentidos Opostos);
- Carga máxima aplicada (semi - eixo) 9tf;
- Possibilidades de Pneus a serem utilizados: 900 x 20, 1.000 x 20 ou *super single*.



Figura 22: Simulador de tráfego tipo HVS empregado na pesquisa.

O equipamento possui ainda os seguintes componentes que merecem ser destacados:

a) Sistema de Guiamento do Rodado: O equipamento possui um conjunto de rodado duplo ou simples que exerce pressão sobre o pavimento ensaiado. O carro possui rodas laterais que promovem o seu guiamento sobre trilhos tracionados por um cabo de aço conforme figura 23.



Figura 23: Detalhe do guiamento do simulador de tráfego.

b) Sistema de Aplicação de Cargas: A aplicação de carga se faz através de uma unidade hidráulica (figura 24), comandada por um cilindro hidráulico e pode variar de 1,5tf até 9tf, com uma velocidade média de 8km/h, no semi-eixo, o que permite acelerar os esforços associados ao carregamento e simular, efetivamente, as sobrecargas.



Figura 24: Detalhe da unidade hidráulica do simulador de tráfego.

O sistema pode realizar o deslocamento em um único sentido (unidirecional) ou nos dois sentidos (sentidos - opostos), conforme determinação do pesquisador ou objetivo do trabalho:

- 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).

A aplicação da carga é controlada por manômetros, posicionados junto ao rodado do equipamento (figura 25).

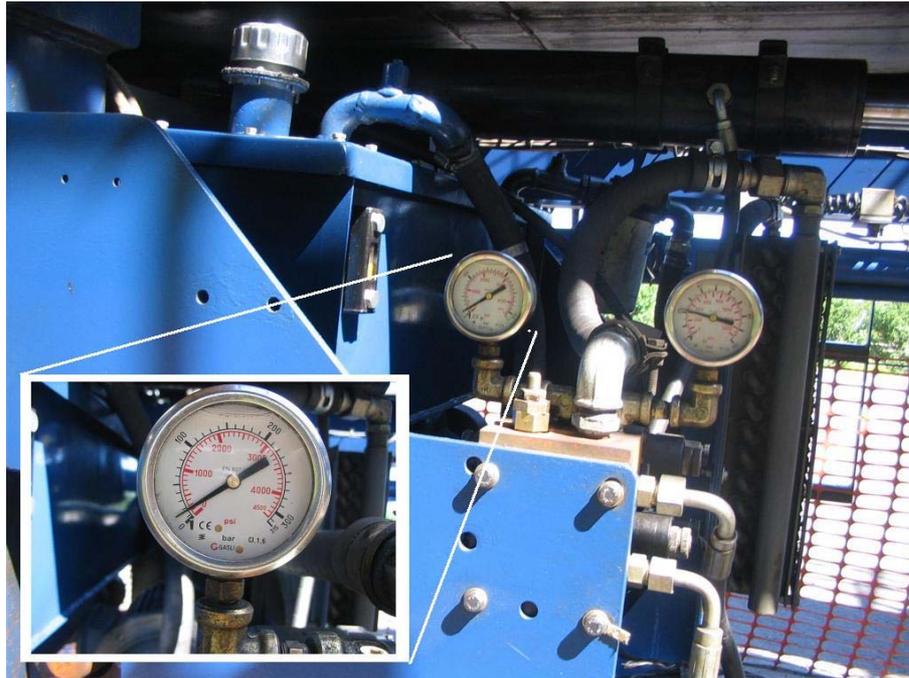


Figura 25: Detalhe do manômetro de aplicação de carga do simulador de tráfego.

c) 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 Contínuo: 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. A figura 26 apresenta o mecanismo responsável pelo deslocamento transversal. A figura 27, por sua vez, mostra os sensores que controlam esse deslocamento transversal, guiando o rodado de um sentido ao outro transversalmente, de acordo com o deslocamento pré-estabelecido.

O deslocamento transversal pode ser de até 1,0m.



Figura 26: Detalhe do elemento mecânico responsável pelo deslocamento transversal do simulador de tráfego.



Figura 27: Detalhe dos sensores que controlam o deslocamento transversal do simulador de tráfego.

d) Sistema de Amortecimento: O sistema de amortecimento é um dispositivo de segurança composto por molas 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 28).



Figura 28: Detalhe do elemento de amortecimento do simulador de tráfego.

e) 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 (figura 29).



Figura 29: Detalhe do sistema de acionamento do simulador de tráfego.

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 gerando a desaceleração/aceleração do carro (figura 30).



Figura 30: Detalhe dos sensores indutivos do simulador de tráfego.

f) Sistema de Controle: O sistema de controle, localizado na parte traseira do equipamento, é composto por um quadro de comando elétrico e de um microprocessador, que aciona todos os sistemas integrantes do simulador de tráfego, conforme mostrado na figura 31.



Figura 31: Detalhe do painel de controle do simulador de tráfego.

g) Sistema de Rodado: O sistema de rodado do carro se dá por um braço articulado que possui um semi-eixo de caminhão na extremidade. São utilizados rodados comerciais de caminhões, conforme mostra a figura 32.



Figura 32: Detalhe do sistema de rodado do simulador de tráfego.

h) 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.

i) Sistema de Emergência: O sistema é composto por duas caixas de segurança instaladas nas laterais do simulador conforme mostrado na figura 33. Também possui um sistema de emergência no quadro de controle, dentro da cabine.



Figura 33: Detalhe do sistema de emergência do simulador de tráfego.

j) Tanques de água: O equipamento possui 3 tanques de água, com capacidade de 8.850 litros cada, que auxiliam na estabilidade do equipamento (figura 34). Esses tanques também abastecem a água utilizada nos ensaios para simular as precipitações pluviométricas, possibilidade complementar do equipamento. Tal simulação de precipitações ocorre por espargidores de água posicionados ao longo do equipamento (figura 35).



Figura 34: Detalhe de um dos tanques de água do simulador de tráfego.



Figura 35: Detalhe de um dos espargidores de água que simulam as precipitações pluviométricas no simulador de tráfego.

k) Deslocamento do equipamento: Este equipamento tem fácil mobilidade e pode ser deslocado entre os locais de testes, bastando realizar o engate do simulador a um cavalo mecânico (figura 36).



Figura 36: Detalhe do engate do simulador de tráfego a um cavalo mecânico.

Desse modo, o equipamento simulador de tráfego pode ser facilmente deslocado através de um cavalo mecânico (figura 37) para o local de ensaio, sendo esse o grande diferencial em relação a outros simuladores.



Figura 37: Detalhe do simulador de tráfego sendo deslocado pelo cavalo mecânico.

### 3.2.1 Resumo das configurações do simulador de tráfego adotadas nesta pesquisa

Tendo em vista as características do equipamento simulador de tráfego utilizado nesta pesquisa, são apresentadas a seguir as configurações definidas que foram empregadas particularmente para os ensaios do presente estudo.

#### 3.2.1.1 Carregamento aplicado pelo simulador

Na pesquisa, o simulador de tráfego aplicou sobre o pavimento uma carga de 8tf em um semi-eixo simples de roda dupla, ou seja, considerando-se um eixo padrão completo, o pavimento seria solicitado a uma carga de 16tf, praticamente o dobro da carga padrão considerada em projetos de pavimentação (8,2tf). Para verificação do carregamento aplicado, antes do início dos ensaios calibrou-se o sistema hidráulico do equipamento, responsável pela aplicação da

carga, através de uma célula de pressão instalada sob o eixo do rodado, com a qual verificou-se a pressão hidráulica necessária a ser exercida para ocorrer a aplicação pelo rodado da carga definida. A figura 38 apresenta a calibração sendo realizada com o uso de célula de carga cedida pelo Laboratório de Pavimentação da UFRGS.



Figura 38: Calibração da carga a ser aplicada pelo rodado com o uso de uma célula de carga (em detalhe a leitura da célula de carga).

Embora tecnicamente o equipamento pudesse aplicar uma carga superior à definida (limite é de 9tf), adotou-se um carregamento de 8tf para os ensaios da pesquisa, pois um carregamento muito próximo do limite poderia forçar os elementos hidráulicos e mecânicos do simulador, o que acarretaria seguidas paralisações dos ensaios para conserto de tais elementos.

Utilizou-se a aplicação da carga em um sentido único, ou seja, o equipamento se deslocava, em um sentido, solicitando o pavimento e retornava suspenso à posição inicial, se deslocando no sentido oposto, sem exercer o carregamento. Tal definição visa o objetivo de considerar a fadiga do pavimento em análise. Em experiências anteriores (Fritzen, 2005), tem se recomendado o sentido oposto para estudos de afundamento de trilha de roda e o sentido

único para estudos de fadiga, devido ao fato de as tensões cisalhantes que se desenvolvem em um sentido e depois no outro tenderem a “fechar” as trincas.

A carga do simulador foi aplicada a uma velocidade de 8km/h. Se for considerada que a velocidade média dos veículos pesados que transitam pela rodovia é de 80km/h, o simulador aplicou a carga de 8tf a uma velocidade 10 vezes inferior à real exercida pelos veículos sobre o pavimento.

Foram utilizados na pesquisa pneus de dimensões 900 x 20, com pressão de inflação de 100psi, verificada semanalmente durante os ensaios.

Por ser uma pista que possui inclinações longitudinais (acompanhando o relevo) e transversais (para escoamento da água superficial), foi necessário corrigir tais inclinações com ajustes nas alturas dos apoios do equipamento simulador de tráfego, de modo que o mesmo acompanhasse o nível da pista e a carga aplicada pelo simulador fosse mantida a mesma em toda a área ensaiada.

#### 3.2.1.2 Distribuição transversal das 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, das 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 da estrutura da rodovia BR-290/RS, que tem sido o deslocamento utilizado em outros estudos.

A distribuição transversal de cargas do rodado é mostrada na figura 39, relacionando pontos na trilha de roda, segundo um eixo transversal de atuação, com a porcentagem de solicitações nesses pontos.

Utilizou-se nos ensaios o Deslocamento Transversal Contínuo, ou seja, o deslocamento transversal ocorria simultaneamente durante o deslocamento longitudinal do rodado do simulador.

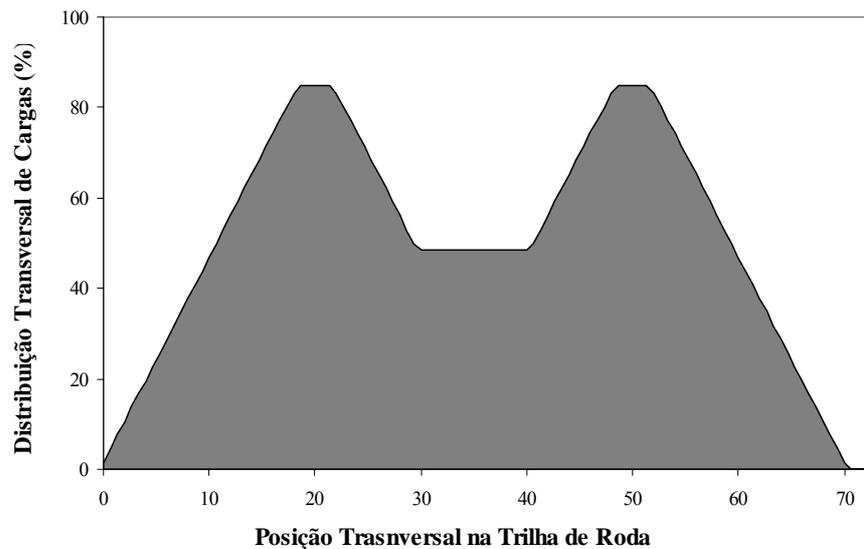


Figura 39: Distribuição transversal de carga.

### 3.2.1.3 Simulação das precipitações pluviométricas

Conforme destacado, o simulador de tráfego utilizado nesta pesquisa possibilita a simulação de precipitações pluviométricas. No estudo, para a Seção Teste 1, ensaiada primeiramente, definiu-se acionar o simulador de precipitações durante 5 minutos a cada 1 hora. Durante os ensaios, a precipitação real foi monitorada. Assim, para a Seção Teste 2, ensaiada posteriormente, buscou-se acionar o simulador de precipitações de modo a equilibrar o regime hidráulico exercido sobre o pavimento para os dois ensaios realizados. Ou seja, somando-se as precipitações reais com as simuladas, os dois ensaios teriam o mesmo volume de água exercido sobre o pavimento.

## 3.3 PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO EM CAMPO

Para medidas da variação dos parâmetros de desempenho de cada seção teste avaliada, dividiu-se o segmento ensaiado pelo simulador de tráfego em 10 segmentos de 1m de extensão cada (figura 40). 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 da seção teste, como ilustrado na figura 40 (seções S1, S2, S3, S4 e S5).

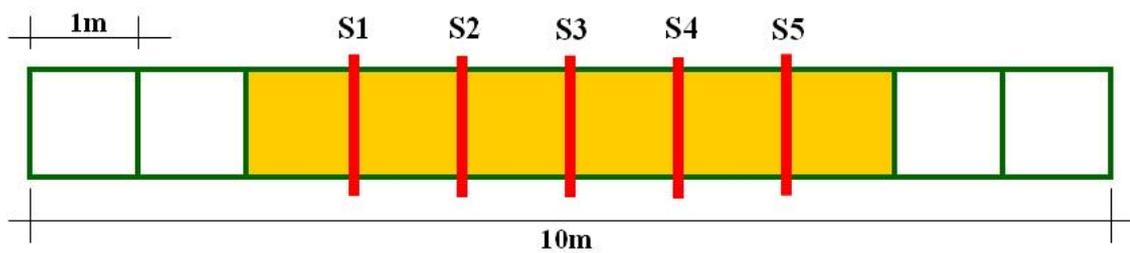


Figura 40: Seções levantadas no ensaio com o simulador.

### 3.3.1 Medidas deflectométricas

O acompanhamento das respostas estruturais foi realizado através de medidas das deflexões do pavimento em cada seção teste ensaiada pelo simulador de tráfego.

Nos ensaios desta pesquisa, as medições deflectométricas foram realizadas através da Viga Benkelman e do Deflectógrafo Digital (figura 41), sendo possível o acompanhamento das deflexões do pavimento com a evolução do número de passadas do trem de cargas do simulador. Ambos equipamentos utilizados pertencem à Concepa.

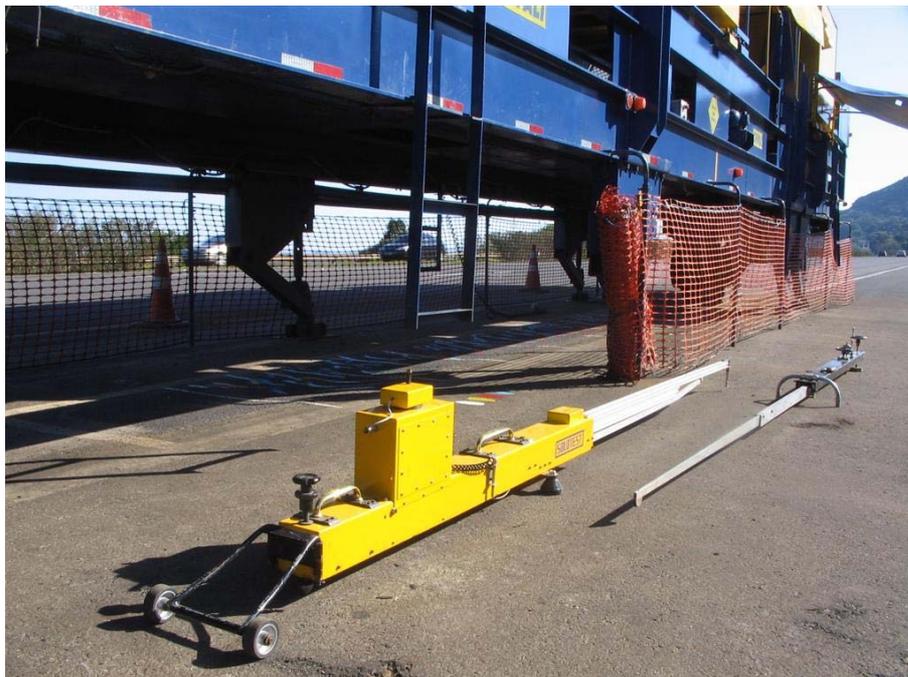


Figura 41: Viga Benkelman e Deflectógrafo Digital utilizados na pesquisa com o simulador de tráfego.

As medidas deflectométricas foram realizadas em levantamentos semanais em cada uma das cinco seções transversais consideradas na seção teste analisada. Em cada seção transversal foram realizadas 3 leituras, obtendo-se, a partir dessas, a média para cada seção transversal e, com a média das cinco seções transversais, a média geral para a seção teste em cada levantamento.

Nas medidas das deflexões, a carga aplicada pelo rodado do simulador era reduzida para a carga padrão de levantamentos deflectométricos (DNER-ME 024/94), igual a 8,2tf por eixo (ou 4,1tf por semi-eixo). A pressão dos pneus era mantida igual à aplicada durante os ensaios acelerados (100psi) devido a dificuldades operacionais em variar seguidamente a pressão de inflação dos pneus.

Nos levantamentos deflectométricos, também foram medidas as temperaturas do revestimento asfáltico na superfície do pavimento. Fez-se, assim, a correção das deflexões em função das temperaturas do pavimento no momento do levantamento. Tal correção foi realizada a partir da consideração da variação do módulo de resiliência em função da temperatura da camada de concreto asfáltico, obtida a partir de amostras extraídas do local do ensaio com o simulador, conforme será melhor detalhado ainda neste capítulo.

Sobre as bacias de deflexões obtidas com o Deflectógrafo Digital realizou-se também uma análise estatística, ajustando os pontos medidos nos levantamentos ao modelo da equação 2, adotado em diversos estudos, como o realizado por Albernaz (1997).

$$D_x = \frac{D_0}{k.r_x^n + 1} \quad (\text{equação 2})$$

onde:  $D_x$  = deflexão em um ponto situado a uma distância  $x$  ( $10^{-2}$ mm);

$D_0$  = deflexão máxima da bacia ( $10^{-2}$ mm);

$r_x$  = distância do ponto em relação à posição da ponteira do deflectógrafo (cm);

$k, n$  = parâmetros a serem obtidos na análise estatística;

Utilizou-se o software comercial STATISTICA para obter os parâmetros  $k$  e  $n$ .

### 3.3.2 Evolução do trincamento

A análise da evolução de trincas na superfície do pavimento foi efetuada através de inspeção visual, realizada semanalmente em conjunto com as medições deflectométricas. Nas inspeções foram demarcadas todas as trincas da superfície existentes nos 6m de extensão útil do simulador (desconsiderando os 2m iniciais e finais das seções testes). A figura 42 apresenta um exemplo da demarcação de trincas sendo realizada. Para facilitar a visualização do surgimento e evolução do trincamento, as trincas foram demarcadas com tinta utilizando em cada semana diferentes cores. Cada cor representava, assim, um número de ciclos de carga aplicados pelo simulador, seguindo a seguinte seqüência de cores: branca, amarela, vermelha, azul e verde.

A cada inspeção, as trincas também foram desenhadas em papel milimetrado, com o auxílio de uma grade metálica de 1,0 x 1,0m (figura 43), subdividida em quadrados de 10cm de lado, colocada sobre o revestimento trincado, facilitando a transposição dos levantamentos. Posteriormente, as trincas também foram repassadas para via digital, auxiliando na representação da evolução das trincas.



Figura 42: Demarcação das trincas nas seções ensaiadas pelo simulador de tráfego nesta pesquisa.



Figura 43: Grade metálica auxiliando na transposição das trincas para papel milimetrado e, posteriormente, para via digital

Para quantificar a evolução das trincas, realizaram-se ainda as medidas do comprimento das mesmas, adotando-se o Método da Gravidade, que consiste na medida de comprimento das trincas por área trafegada. Desse modo, somando as extensões de todas as trincas (com o auxílio de um barbante), estabeleceu-se a taxa de evolução das trincas da superfície do pavimento. 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.

### 3.3.3 Deformações permanentes

Acompanhou-se a evolução das deformações permanentes do pavimento com uma treliça metálica (figura 44 e figura 45), que permitiu determinar o afundamento de trilha de roda das seções analisadas.

As medidas das deformações permanentes foram realizadas semanalmente, concomitantemente aos levantamentos deflectométricos e de trincamento, nas cinco seções transversais consideradas efetivas em cada seção teste ensaiada. Foram determinados os valores individuais para cada seção transversal e a média das cinco seções em cada levantamento.



Figura 44: Exemplo de medida do afundamento de trilha de roda sendo realizada neste experimento.

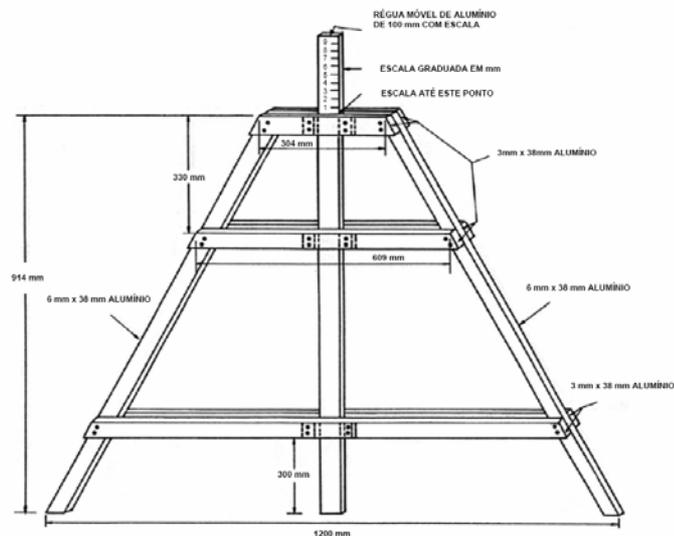


Figura 45: Treliça metálica utilizada para determinação do afundamento de trilha de roda (DNIT 006/2003-PRO).

### 3.3.4 Parâmetros ambientais

Para validar e auxiliar as análises da evolução das deflexões, do trincamento e das deformações permanente do pavimento considerado no estudo, foi realizada a reunião de dados de acompanhamento das temperaturas médias do ar e das precipitações pluviométricas durante o período de ensaios.

As informações da temperatura do ambiente durante os ensaios acelerados com o simulador de tráfego foram obtidas através de dados do 8º Distrito Meteorológico, a partir de estação meteorológica localizada na cidade de Porto Alegre. As cidades de Porto Alegre e Osório, embora distantes quase 100km, apresentam condições de temperatura semelhantes, principalmente por ambas situarem-se em baixas altitudes em relação ao nível do mar.

As informações a respeito das precipitações pluviométricas, por sua vez, foram obtidas através de dados da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul, com os valores de precipitações medidos em pluviômetro situado na cidade de Osório.

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO

#### 3.4.1 Retiradas de amostras em campo e preparação para ensaios

Complementando a avaliação da estrutura de pavimento analisada neste estudo, foram realizados ensaios laboratoriais sobre a camada asfáltica do local ensaiado pelo simulador de tráfego. Para tanto, foram extraídos corpos-de-prova das quatro condições finais do pavimento do local após os ensaios com o simulador em campo estarem concluídos (figura 46).



Figura 46: Extração de corpos-de-prova no trecho ensaiado pelo simulador de tráfego na rodovia BR-290/RS.

O esquema apresentado na figura 42 ilustra a localização dos 47 corpos-de-prova extraídos do local, sendo definida a extração de 8 corpos-de-prova de cada condição final do pavimento (totalizando 32 corpos-de-prova) e mais 15 corpos-de-prova adicionais da situação do pavimento sem nenhuma solicitação (do tráfego real ou do simulador).

As amostras extraídas contemplavam toda a camada de revestimento asfáltico, possuindo 8cm de espessura, sendo, como já observado, os 4cm inferiores de mistura asfáltica convencional e os 4cm superiores de mistura asfáltica com ligante modificado (asfalto-borracha). Para os ensaios laboratoriais programados é recomendado por questões técnicas dos equipamentos que as amostras possuam espessuras mínimas de 4,5cm. Assim, as dimensões do pavimento analisado não permitiam a avaliação independente dos dois tipos de revestimentos asfálticos, segmentando os corpos-de-prova extraídos em duas amostras de 4cm. Até mesmo pelo fato de ser necessário, em amostras extraídas de campo, regular (deixar plana) a parte inferior do corpo-de-prova, diminuindo assim a espessura total da amostra.

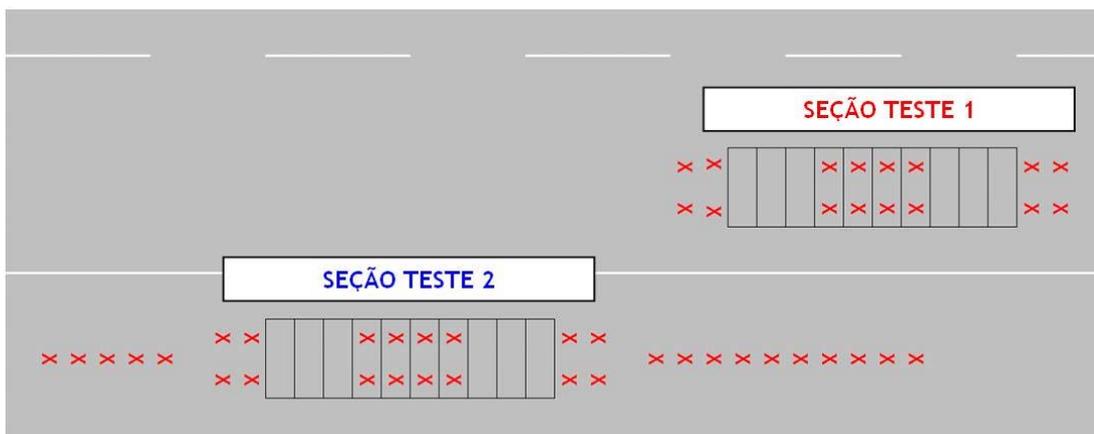


Figura 47: Esquema da extração de corpos-de-prova no trecho ensaiado pelo Simulador de Tráfego.

Dessa maneira, definiu-se considerar na análise laboratorial somente a camada inferior, por ser essa a solicitada a maiores esforços de tração, que comanda a vida de serviço do pavimento quanto à fadiga. Como havia a recomendação de ensaiar amostras com no mínimo 4,5cm de espessura, sobre os corpos-de-prova extraídos realizou-se a regula da parte inferior e, a partir dessa regula, executou-se um corte segmentando a amostra, de modo a garantir novos corpos-de-prova com aproximadamente 5cm de espessura, contemplando em sua quase totalidade a camada de asfalto convencional (camada inferior), mas também uma parcela da camada de asfalto-borracha (camada superior). A figura 48 ilustra esquematicamente essa segmentação realizada previamente antes dos ensaios laboratoriais.

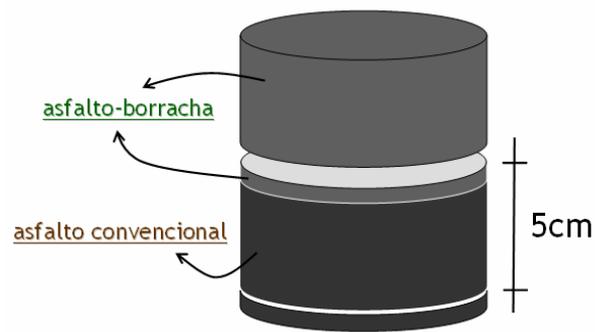


Figura 48: Esquema da segmentação dos corpos-de-prova extraídos para a realização de ensaios laboratoriais.

Ainda, antes dos ensaios laboratoriais serem realizados, foram efetuadas medidas da densidade aparente e do volume de vazios dos corpos-de-prova do revestimento asfáltico extraídos da pista. Para tanto, foi obtida a relação entre o peso da mistura asfáltica ao ar e a diferença entre o peso ao ar e o peso da mistura em suspensão na água. O procedimento do ensaio está descrito na norma DNER–ME 117/94. A partir da determinação do volume de vazios das amostras, os corpos-de-prova foram divididos em grupos, de modo a distribuir as amostras a serem ensaiadas em cada tipo de experimento em laboratório.

Complementarmente, também foram, após a extração dos corpos-de-prova, abertos poços de inspeção no local dos ensaios acelerados, ultrapassando todas as camadas do pavimento até a camada de subleito (figura 49).



Figura 49: Poços de inspeção abertos nos locais dos ensaios acelerados.

### 3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral, tração indireta ou tração por compressão diametral, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland (Carneiro, 1943) e tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e misturas asfálticas.

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral nas amostras de revestimento asfáltico, realizados nos corpos-de-prova extraídos para esta pesquisa, utilizou-se uma prensa com capacidade para 70kN, do Laboratório de Pavimentação, da UFRGS, apresentada na figura 50, seguindo-se as prescrições da norma DNER-ME 138/94.



Figura 50: Equipamento utilizado para determinação de resistência a tração por compressão diametral das amostras deste estudo.

A formulação utilizada para o cálculo da resistência à tração é a apresentada na equação 3.

$$R_t = \frac{2F}{\pi.d.h} \quad (\text{equação 3})$$

onde:  $R_t$  = resistência à tração;

$F$  = força aplicada;

$h$  = altura do corpo-de-prova;

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova.

A configuração desse ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. O Estado de tensões gerado na amostra durante o carregamento está esquematicamente apresentado na figura 51.

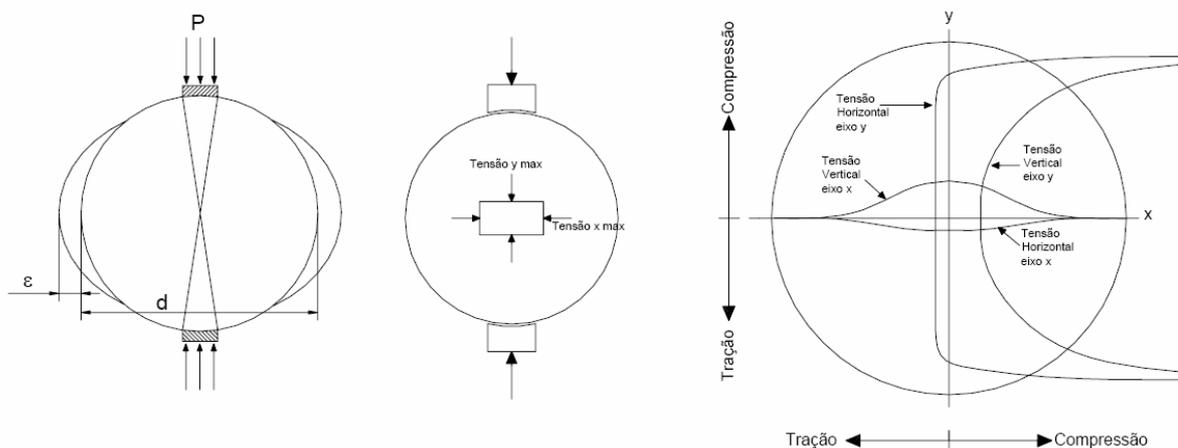


Figura 51: Estado de tensões gerado no ensaio de resistência a tração por compressão diametral (Specht, 2004).

### 3.4.3 Ensaio de módulo de resiliência

Os módulos de resiliência nas amostras de revestimento asfáltico ensaiadas nesta pesquisa foram determinados através das prescrições do método ME 133: Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência (DNER, 1994), complementadas conforme Brito (2006)

O equipamento utilizado é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. As deformações horizontais foram medidas através de um transdutor tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer) conectado a um microcomputador. A descrição detalhada do equipamento e de seu sistema de aquisição e

controle é apresentada por Brito (2006). O conjunto do equipamento utilizado nesta dissertação é ilustrado na figura 52. A figura 53, por sua vez, apresenta um maior detalhamento esquemático do sistema de carregamento.



Figura 52: Equipamento do Laboratório de Pavimentação da UFRGS utilizado para determinação do módulo de resiliência (Brito, 2006).

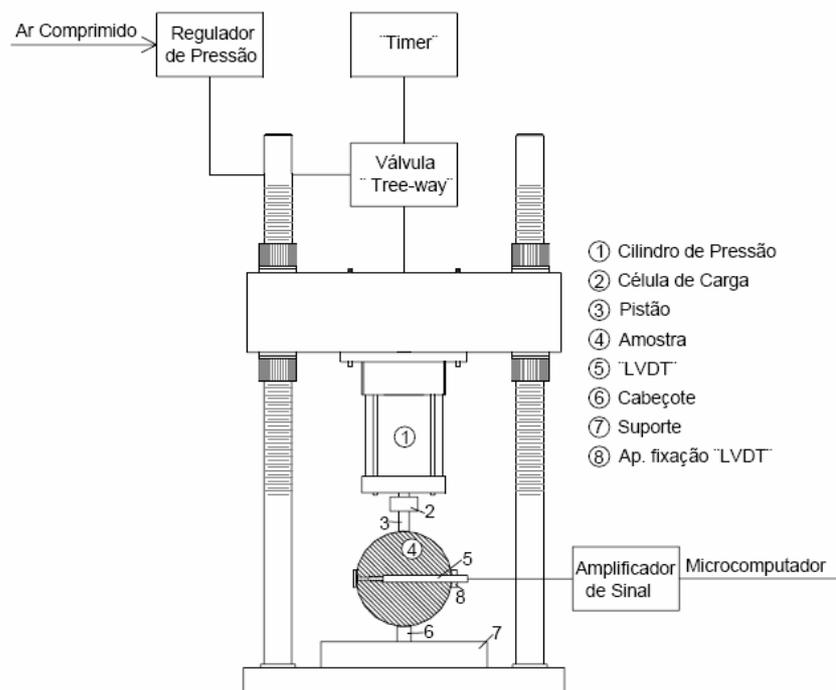


Figura 53: Detalhe do sistema de carregamento do equipamento utilizado para determinação do módulo de resiliência (Specht, 2004).

Para os ensaios de módulo de resiliência desta pesquisa, o carregamento aplicado foi de 15% da resistência à tração das amostras ensaiadas. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30, valor típico adotado em misturas asfálticas.

A formulação utilizada para o cálculo do módulo de resiliência é a apresentada na equação 4.

$$Mr = \frac{P}{\Delta h \cdot 10^6} \cdot (0,2692 + 0,9976 \cdot \mu) \quad (\text{equação 4})$$

onde:  $Mr$  = módulo de resiliência dado em MPa;

$P$  = carga aplicada, em N;

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga;

$h$  = altura do corpo-de-prova;

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

#### 3.4.3.1 Variação do tempo de aplicação de carga nos ensaios

Barksdale (1971) propôs uma relação entre a velocidade do veículo e a profundidade de análise com o tempo do pulso de tensão vertical. No estudo de Barksdale (1971), foi considerada uma estrutura composta por um revestimento asfáltico de 100mm, base de brita de 380mm e subleito de argila siltosa.

Medina e Motta (1995) também realizaram estudos com análises semelhantes para uma estrutura de revestimento asfáltico de 100mm, base de brita de 300mm e 150mm de solo granular como material de reforço. No estudo, foi considerado o pulso de carga com distribuição triangular.

Na figura 54 são apresentados os resultados sobrepostos obtidos por Barksdale (1971) e Medina e Motta (1995). Observa-se que as inclinações das curvas são iguais nos dois casos estudados. Os tempos de pulso de carga obtidos também são similares, embora os

apresentados por Barksdale (1971) sejam levemente menores do que os analisados por Medina e Motta (1995).

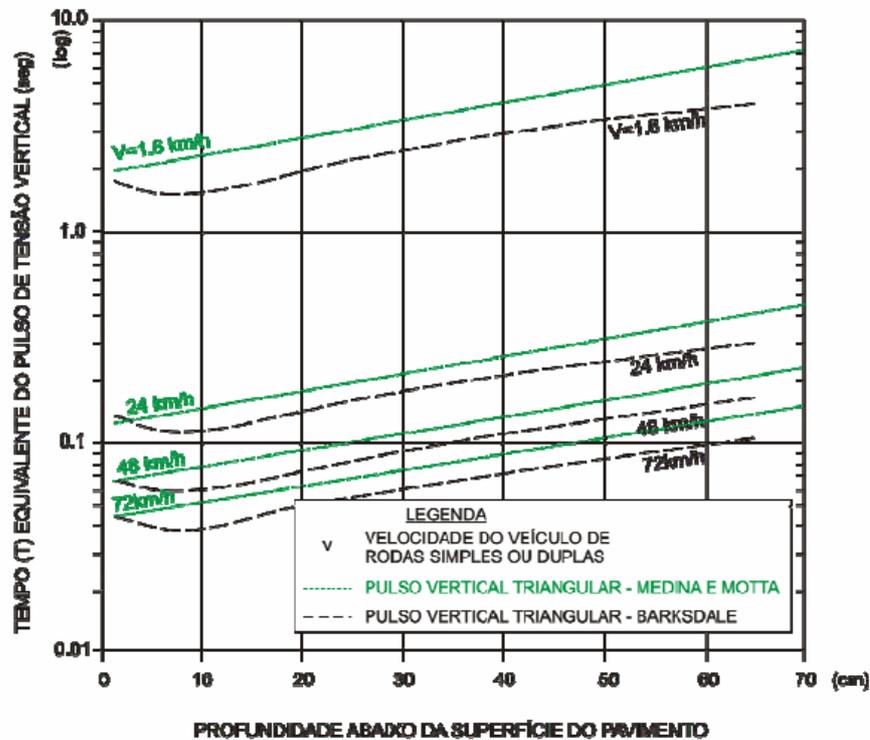


Figura 54: Tempo do pulso de carga em função da velocidade da aplicação da carga obtidos por Barksdale (1971) e Medina e Motta (1995) (resultados sobrepostos por Brito, 2006).

A partir dessas considerações, observa-se que o tempo de aplicação para a velocidade média verificada em pavimentos rodoviários, de 80km/h, seria de aproximadamente 0,02s para uma espessura de revestimento asfáltico de 8cm. Esse tempo, no entanto, é significativamente inferior aos usualmente empregados em ensaios de módulo de resiliência devido principalmente às limitações dos sistemas pneumáticos, que, em função do efeito de compressibilidade do ar, torna muito difícil a aplicação de tempos menores do que 0,1s, que é o valor de referência usualmente considerado nos ensaios, e que representa a aplicação de um veículo à velocidade aproximada de 25km/h.

Gonçalves (2002) e Azambuja (2004) estudaram o desempenho de pavimentos flexíveis em ensaios acelerados com o simulador de tráfego linear UFRGS-DAER/RS. Em ambos os estudos, as pistas ensaiadas foram instrumentadas, medindo-se os pulsos de tensão quando o pavimento era solicitado pelo trem de carga do simulador, um semi-eixo de rodas duplas

trafegando a velocidade de 6km/h. Nessas medições, foi obtido o pulso de tensão apresentado na figura 55 por Brito (2006) a partir dos resultados de Gonçalves (2002) e Azambuja (2004).

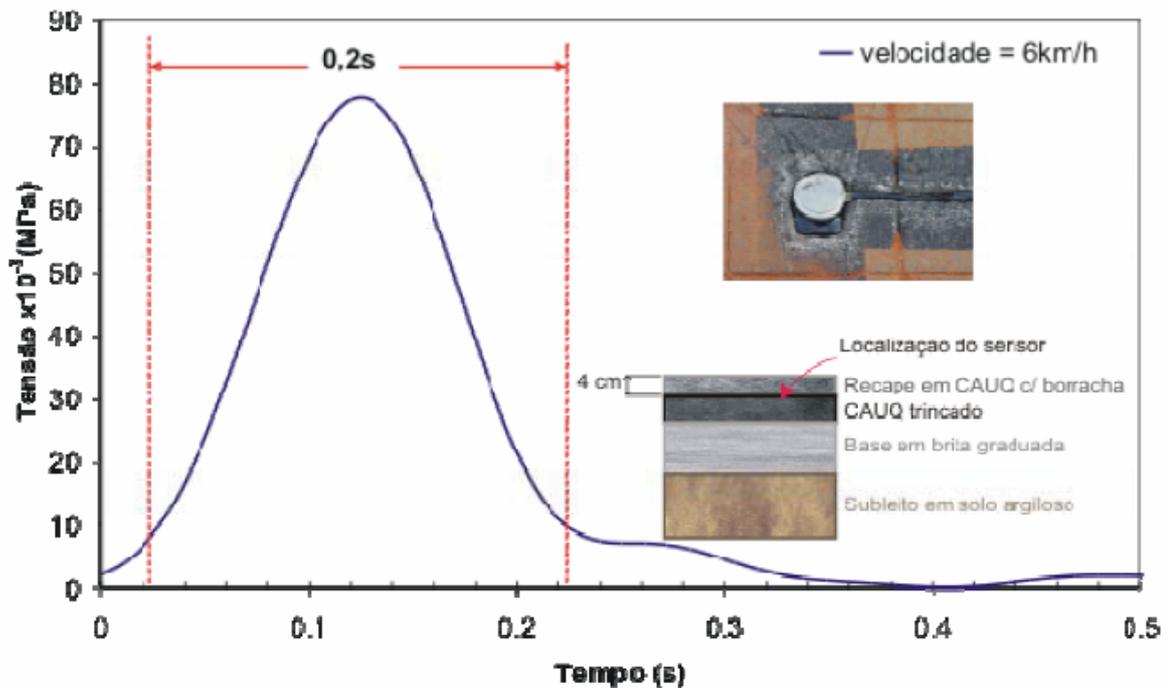


Figura 55: Pulso de tensão em ensaios com o simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS (Brito, 2006).

Observa-se que o pulso de carga registrado de 0,2s para as solicitações do simulador a 6km/h estão de acordo com o tempo proposto por Barksdale (1971) e Medina e Motta (1995).

Nos ensaios desta pesquisa, como um dos objetivos é avaliar a influência da baixa velocidade do simulador de tráfego empregado no estudo (aproximadamente igual a 8km/h) nos resultados dos ensaios acelerados, realizaram-se ensaios de módulo de resiliência das misturas asfálticas com diferentes tempos de aplicação de carga (0,1s e 0,2s).

#### 3.4.3.2 Variação da forma do pulso de carga nos ensaios

A forma do pulso de carga em ensaios de módulo de resiliência deve ser similar ao carregamento verificado em campo (Huang, 2004). Estando a carga distante a um certo ponto, a tensão nesse ponto é nula. Por sua vez, no momento em que a carga está diretamente acima desse ponto, a tensão será máxima. Desse modo, é razoável assumir que pulsos de carga tenham a forma de um semi-seno-verso ou triangulares (Barksdale, 1971; Medina e Motta,

1995; Brito, 2006). A forma semi-seno-verso prevalece a pequenas profundidades e a forma triangular a grandes profundidades (Medina e Motta, 1995). Salienta-se que a forma semi-seno-verso (figura 56) tem sido a mais aplicada e recomendada em ensaios de módulo de resiliência das misturas asfálticas (Barksdale *et al.*, 1997).

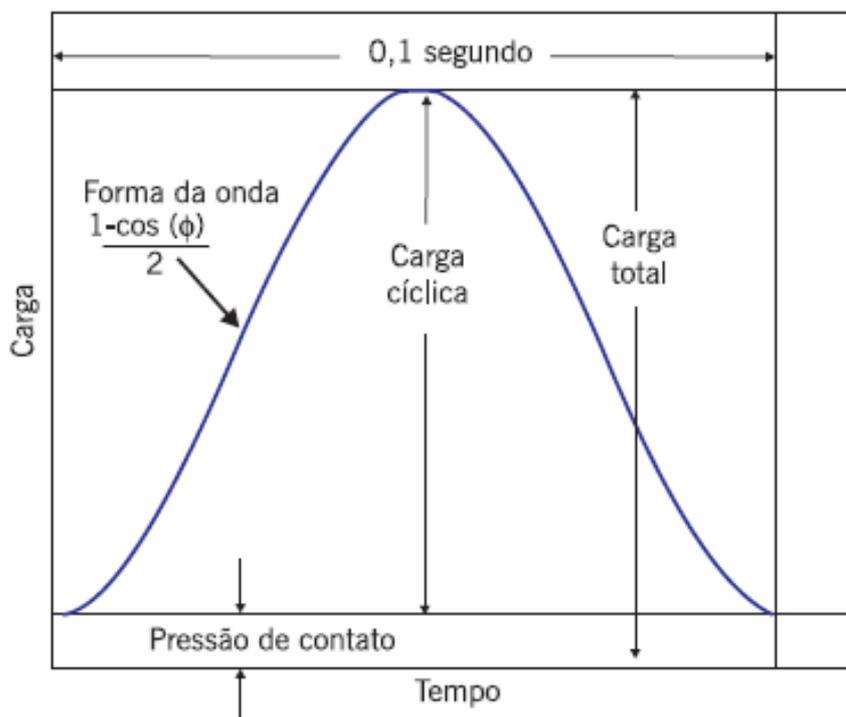


Figura 56: Pulso de carga semi-seno-verso, típico em ensaios de módulo de resiliência (adaptado de NCHRP-285).

Observa-se que a forma do pulso de tensão obtido nos ensaios com o simulador da UFRGS-DAER/RS (figura 54) é similar a apresentada na figura 55, evidenciando que a forma semi-seno-verso é a que melhor representa a ação de um carregamento sobre o pavimento.

Para ensaios com maior tempo de aplicação de carga, Brito (2006) observa que o equipamento de ensaios de módulo de resiliência utilizado nesta pesquisa pode aplicar duas diferentes formas de pulso: a forma semi-seno-verso e uma forma próxima de uma onda quadrada, mais fácil de ser obtida operacionalmente, somente com a admissão de um maior volume de ar, para um mesmo tempo de abertura da válvula solenóide (figura 57). Nos ensaios desta pesquisa com tempo de carga de 0,2s, para alcançar a forma semi-seno-verso, se aproximando

ao máximo da forma real de aplicação de carga pelo tráfego, além de aumentar o volume de ar do cilindro de aplicação, aumentou-se a abertura da válvula solenóide.

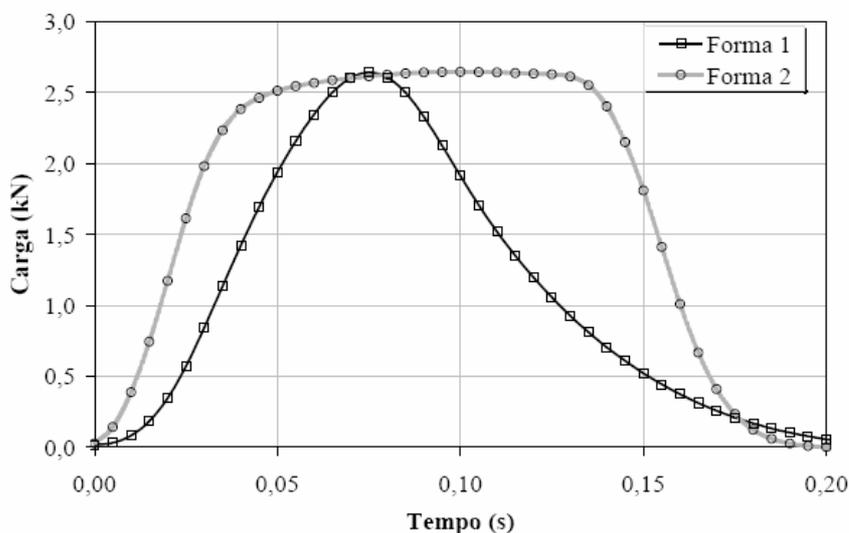


Figura 57: Formas de pulso de carga possíveis nos ensaios com período de carregamento de 0,2s (Brito, 2006).

### 3.4.3.3 Variação do módulo de resiliência de misturas asfálticas com a temperatura

Complementarmente, foram realizados ensaios de módulo de resiliência das misturas asfálticas a diferentes temperaturas. Esses ensaios somente foram efetuados para os corpos-de-prova da condição em que não houve a ação do tráfego real e nem a do simulador, denominada na pesquisa de “CONDIÇÃO C”.

Para esses corpos-de-prova, além dos ensaios de módulo de resiliência a temperatura de 25°C (temperatura de referência), foram realizados ensaios na temperatura média obtida durante o período dos ensaios acelerados em campo com o simulador de tráfego.

Tal variação do módulo de resiliência das amostras em função da temperatura possibilitou estimar a variação dos deslocamentos da camada de revestimento com o módulo, ingressando os módulos obtidos para diferentes temperaturas em um programa computacional de análise tensão-deformação. Utilizou-se, para essa análise, o programa *EVERSTRESS 5.0*, integrante do pacote de softwares para análises mecânicas de pavimentos, *EVERSERIES*, com domínio aberto, desenvolvido pelo Laboratório de Materiais do Departamento de Transportes do Estado de Washington, nos Estados Unidos (EVERSERIES, 2005).

A partir dessa análise, foi possível realizar uma estimativa da correção das deflexões dos pavimentos obtidas em campo em função da temperatura no momento dos levantamentos. A figura 58 apresenta o procedimento considerado para efetuar tal correção.

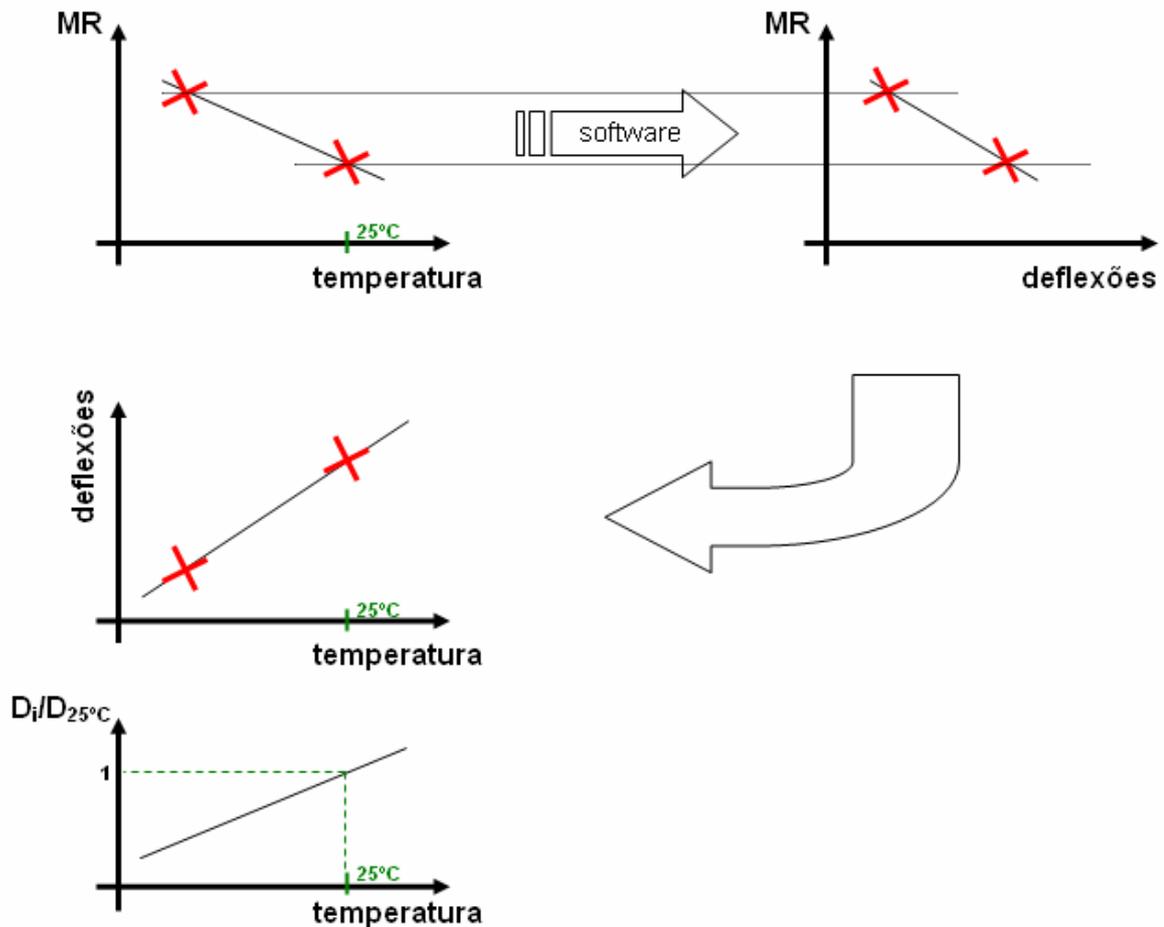


Figura 58: Procedimento considerado para a correção das deflexões do pavimento em função da temperatura.

#### 3.4.4 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga nas amostras de revestimento asfáltico desta pesquisa foram realizados seguindo o procedimento de compressão diametral ou tração indireta à tensão controlada. Este tem sido o ensaio mais utilizado no Brasil devido à simplicidade na execução e na elaboração das amostras, que podem ser preparadas em um compactador Marshall ou extraídas da pista, como as ensaiadas neste estudo.

Os ensaios de fadiga desta pesquisa também foram executados somente sobre os corpos-de-prova da “CONDIÇÃO C”, que não haviam sido solicitados nem à ação do tráfego e nem a ação do simulador, permitindo a determinação do ciclo de vida de fadiga completo da camada de revestimento analisada (desde sua construção até o término da vida de serviço quanto à fadiga).

Para a determinação da fadiga, foi utilizado o mesmo sistema de carregamento, aquisição e controle do ensaio de módulo de resiliência, entretanto a amostra era submetida a diversos níveis de tensão – variando de 10 a 60% da resistência de tração das amostras – e levadas à ruptura por fadiga. A temperatura dos ensaios foi de 25°C.

A figura 59 ilustra o equipamento utilizado na determinação da curva de fadiga das amostras desta pesquisa.



Figura 59: Equipamento utilizado para os ensaios de fadiga desta pesquisa.

### 3.4.5 Matriz experimental dos ensaios laboratoriais

A matriz experimental dos ensaios laboratoriais desta pesquisa, apresentada no quadro da figura 60, contou com diferentes configurações de ensaios para cada condição do corpo-de-prova considerada, conforme descrito nos itens anteriores. Diferentes tempos de aplicação da carga e temperaturas do ensaio foram considerados.

<b>CONDIÇÃO A</b> (sobre a pista, sem a aplicação do simulador)	<b>Ensaio de RT</b>	25°C	
	<b>Ensaio de MR</b>	25°C	0,1s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
			0,2s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
<b>CONDIÇÃO B</b> (sobre a pista, após a aplicação do simulador)	<b>Ensaio de RT</b>	25°C	
	<b>Ensaio de MR</b>	25°C	0,1s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
			0,2s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
<b>CONDIÇÃO C</b> (sobre o acostamento, sem a aplicação do simulador)	<b>Ensaio de RT</b>	25°C	
		__°C ( <i>temperatura ambiente média do período dos ensaios em campo</i> )	
	<b>Ensaio de MR</b>	25°C	0,1s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
			0,2s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
			__°C ( <i>temperatura ambiente média do período dos ensaios em campo</i> )
<b>Ensaio de fadiga</b>	25°C		
<b>CONDIÇÃO D</b> (sobre o acostamento, após a aplicação do simulador)	<b>Ensaio de RT</b>	25°C	
	<b>Ensaio de MR</b>	25°C	0,1s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)
			0,2s de tempo de pulso de carga (forma semi-seno-verso)

Figura 60: Quadro com a matriz experimental dos ensaios laboratoriais desta pesquisa.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a realização dos ensaios acelerados em campo através do simulador de tráfego linear móvel, modelo HVS, e, posteriormente, com a execução dos ensaios laboratoriais sobre a camada de revestimento asfáltico do pavimento avaliado pelo simulador, foi possível a obtenção de um conjunto de resultados que permitiram efetuar uma análise da estrutura de pavimento da BR-290/RS considerada nesta pesquisa.

### 4.1 ENSAIOS DE CAMPO

Durante o período de operação do simulador de tráfego, foi monitorada a evolução da degradação do pavimento com a atuação das cargas do equipamento. Foram determinadas as evoluções das deflexões, do trincamento e das deformações permanentes para as duas condições inicialmente definidas nos ensaios, sendo, para tanto, ensaiadas duas seções testes. Medidas dos parâmetros ambientais também foram reunidas de modo a conferir o máximo de informações referentes às medidas em campo.

A Seção Teste 1, ensaiada primeiramente, referia-se ao segmento de pista já solicitado desde 2004 pelo tráfego real da rodovia. Estima-se que esse trecho havia sido solicitado até o início dos ensaios a um  $N_{AASHTO}$  de aproximadamente  $4,0 \times 10^6$ . A Seção Teste 2, ensaiada posteriormente, referia-se ao acostamento do trecho da rodovia analisada no primeiro ensaio, possuindo a mesma estrutura e mesma idade de construção, apenas sem ter sofrido o tráfego de veículos, possuindo, antes do ensaio um  $N_{AASHTO}$  próximo a zero.

#### 4.1.1 Histórico de carregamento

A primeira etapa da fase experimental (Seção Teste 1) 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 mecânicos, permanecendo muitos dias sem funcionamento. Ao final dos ensaios o simulador de tráfego havia solicitado o pavimento a 170 mil ciclos, com carga de semi-eixo de 8tf (carga de eixo de 16tf) 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 segunda etapa da fase experimental de campo (Seção Teste 2), por sua vez, ocorreu entre os meses de agosto e outubro de 2007. Ao término dos ensaios, o simulador havia solicitado o pavimento a 255 mil ciclos, com a mesma carga (8tf no semi-eixo) e a mesma inflação de pneus (100psi) aplicados na Seção Teste 1. O equipamento, nesta segunda etapa, ficou em funcionamento 923 horas (38 dias). Ao todo, foram realizados 7 levantamentos nesta 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 8 apresenta um resumo dos levantamentos realizados na Seção Teste 1 e na Seção Teste 2.

Tabela 8: Resumo dos levantamentos realizados.

		<b>data</b>	<b>nº de ciclos</b>	<b>horas trabalhadas</b>
<b>Seção Teste 1</b>	1º levantamento	28/5/2008	0	0
	2º levantamento	5/7/2008	66.000	319
	3º levantamento	12/7/2008	100.000	434
	4º levantamento	17/7/2008	123.000	509
	5º levantamento	26/7/2008	170.000	725
<b>Seção Teste 2</b>	1º levantamento	2/8/2008	0	0
	2º levantamento	9/8/2008	50.000	195
	3º levantamento	24/8/2008	80.000	310
	4º levantamento	3/9/2008	125.000	474
	5º levantamento	19/9/2008	187.000	692
	6º levantamento	26/9/2008	214.000	811
	7º levantamento	2/10/2008	255.000	923

#### 4.1.2 Medidas deflectométricas

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

No momento dos levantamentos, a temperatura da superfície do pavimento era medida com um termômetro digital. Como o objetivo era verificar a temperatura média da camada de revestimento asfáltico, utilizou-se a equação 5 para estimar a temperatura da camada de revestimento a 5cm de profundidade, próximo do centro da camada. Essa equação (Specht, 2005) é válida para regiões de clima subtropical, como a da pesquisa.

$$T_{5cm} = 1,11.T_{sup} - 1,61 \quad (\text{equação 5})$$

onde:  $T_{5cm}$  = temperatura do pavimento a 5cm de profundidade (°C);

$T_{sup}$  = temperatura da superfície do pavimento (°C).

Com a medida das temperaturas realizada, efetuou-se a correção das deflexões, dividindo-se a deflexão medida por um fator de correção. Todas as deflexões obtidas foram corrigidas para a deflexão a 25°C, considerada, nesta pesquisa, a temperatura padrão de ensaio, permitindo comparar os resultados medidos a diferentes temperaturas. A correção utilizada na pesquisa (figura 61) foi obtida a partir de ensaios de módulo de resiliência a diferentes temperaturas de amostras extraídas do local, seguindo o procedimento descrito no item 3.3.3.3. Os resultados desses módulos (a diferentes temperaturas) serão apresentados ainda neste capítulo.

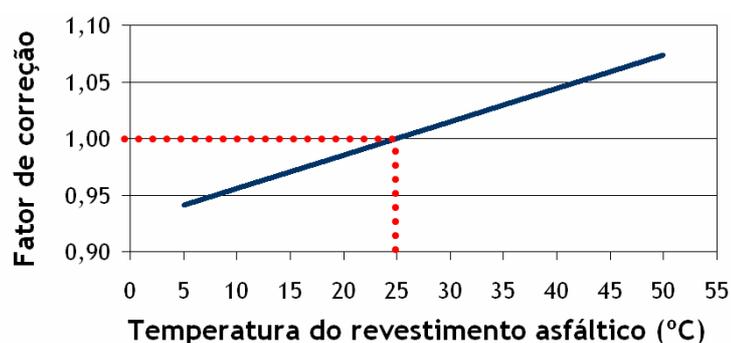


Figura 61: Correção das deflexões em função da temperatura.

É válido observar que não houve uma grande variação da temperatura durante os levantamentos de deflexão (temperatura permaneceu entre 15 e 30 °C), não havendo, assim, diferenças significativas entre a deflexão medida e a corrigida.

As evoluções das deflexões máximas do pavimento flexível obtidas com a Viga Benkelman e com o Deflectógrafo Digital em função do número de solicitações do simulador para as duas seções testes ensaiadas são as apresentadas na figura 62 e figura 63, respectivamente, já efetuadas as correções da temperatura.

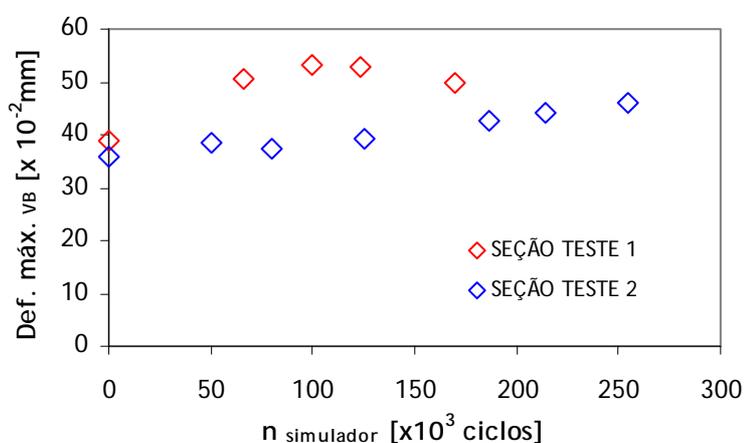


Figura 62: Evolução das deflexões máximas obtidas com a Viga Benkelman

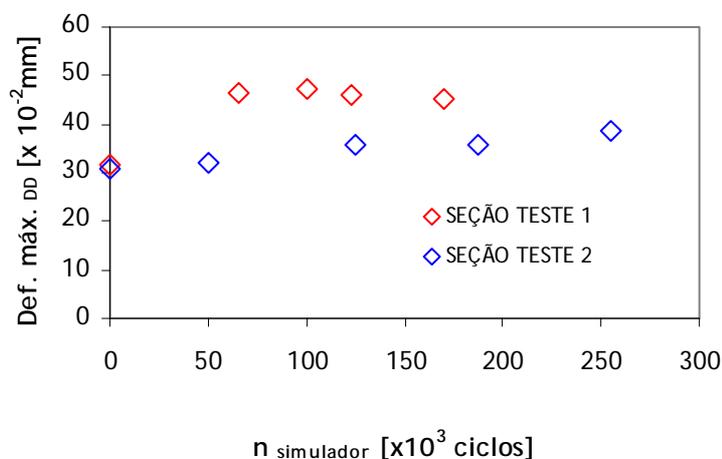


Figura 63: Evolução das deflexões máximas obtidas com o Deflectógrafo Digital

Em todos os resultados verifica-se uma tendência de crescimento das deflexões do pavimento quando submetido ao número de ciclos do simulador de tráfego.

Nos ensaios da Seção Teste 1, houve um significativo aumento das deflexões entre o primeiro e o segundo levantamento tanto nas medidas com a Viga Benkelman como nas com o Deflectógrafo Digital, crescendo, respectivamente, 30% e 55% os níveis deflectométricos em relação às deflexões medidas no início dos ensaios com o simulador. Após, verificou-se uma estabilização dos valores de deflexões até o término do ensaio, com 170.000 ciclos.

Para a Seção Teste 2, embora tenha havido também um aumento das deflexões, mesmo após 250.000 ciclos, o nível deflectométrico permaneceu inferior a  $50 \times 10^{-2}$  mm para a Viga Benkelman e a  $40 \times 10^{-2}$  mm para o Deflectógrafo Digital, valores inferiores aos obtidos na Seção Teste 1, exceto no levantamento inicial dessa seção. Para as medidas com o Deflectógrafo Digital, não foi possível a realização dos ensaios no segundo e sexto levantamento em virtude de problemas com o deflectógrafo.

Observa-se ainda que os níveis deflectométricos no início dos ensaios nas duas seções testes foram bastante próximos. No entanto, para o trecho já solicitado pelo tráfego real antes dos ensaios (Seção Teste 1), de imediato as deflexões passaram para um outro patamar, enquanto que no trecho do acostamento (Seção Teste 2), não solicitado anteriormente, as deflexões finais, embora superiores, permaneceram próximas às obtidas no início do ensaio acelerado.

A diferença dos valores de deflexões verificada entre as medidas com os diferentes equipamentos – Viga Benkelman e Deflectógrafo Digital – é aceitável visto que o mais importante, no estudo, é avaliar a evolução das deflexões com o acréscimo de solicitações pelo simulador. Outros estudos já identificaram e avaliaram diferenças em valores de deflexões obtidos a partir de diferentes equipamentos (Borges, 2001).

Com o Deflectógrafo Digital também foi possível verificar a distribuição das deflexões do pavimento com a determinação das bacias de deslocamentos. Sobre os dados levantados, realizou-se um ajuste estatístico e a correção das deflexões em função da temperatura. A figura 64 apresenta a evolução das bacias de deflexões com o aumento do número de ciclos exercidos sobre o pavimento para a Seção Teste 1 ensaiada pelo simulador.

Enfatiza-se mais claramente, a partir da apresentação das bacias de deflexões, o acréscimo elevado entre o primeiro e segundo levantamento, já observado nos valores das deflexões

máximas apresentadas anteriormente. Após, as bacias de deflexões passam a apresentar um comportamento semelhante, com o mesmo formato de curva, desenvolvendo praticamente um único feixe.

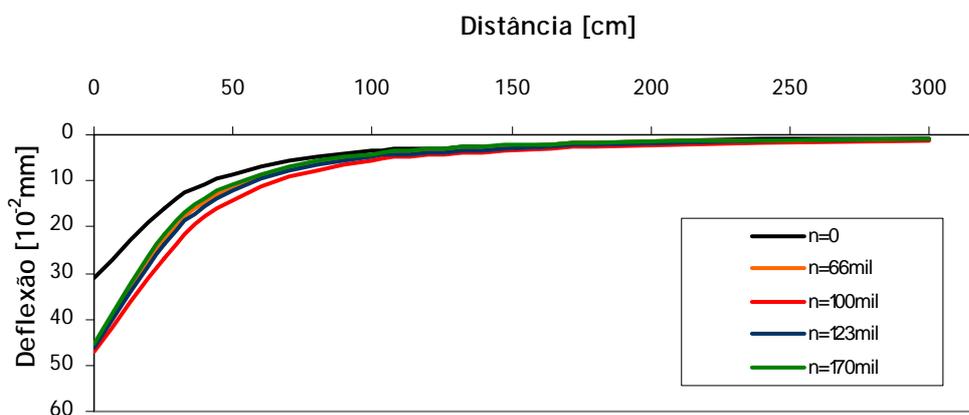


Figura 64: Evolução das bacias de deflexões obtidas com o Deflectógrafo Digital para a Seção Teste 1.

As pequenas variações verificadas nos quatro levantamentos realizados após o início dos ensaios acelerados podem ser consideradas desprezíveis até mesmo pela falta de precisismo dos equipamentos e pelas vários fatores que influenciam as medidas de deflexões, tais como temperatura do pavimento – influência diminuída com a correção das deflexões em função da temperatura – e umidade das camadas inferiores.

As bacias de deflexões para a Seção Teste 2, por sua vez, são apresentadas na figura 65.

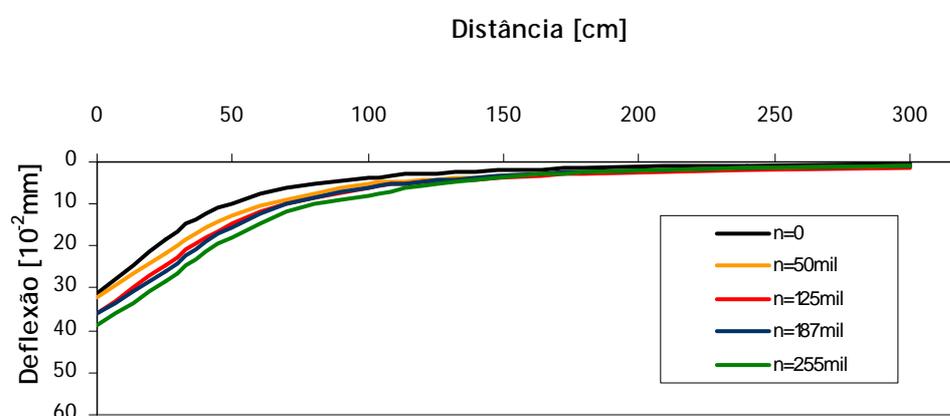


Figura 65: Evolução das bacias de deflexões obtidas com o Deflectógrafo Digital para a Seção Teste 2.

Observa-se que a forma das curvas permanece semelhante ao longo de todo o ensaio acelerado, apenas aumentando-se gradativamente o nível das deflexões.

#### 4.1.3 Evolução do trincamento

Foram realizadas as marcações das trincas do pavimento a fim de avaliar a taxa de crescimento e de propagação das trincas. As marcações sobre a superfície do pavimento foram realizadas semanalmente com tinta. 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 9 para as duas seções testes.

Para a Seção Teste 1, o primeiro levantamento, efetuado antes do simulador iniciar a operação, representava 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, originadas pelo tráfego real da rodovia em quase 3 anos de solicitações.

Tabela 9: Convenção de cores da marcação das trincas no pavimento para a Seção Teste 1 e Seção Teste 2.

	Cor da tinta de demarcação das trincas	
	Seção Teste 1	Seção Teste 2
1º levantamento	branca	-
2º levantamento	amarela	-
3º levantamento	vermelha	branca
4º levantamento	azul	amarela
5º levantamento	verde	vermelha
6º levantamento	x	azul
7º levantamento	x	verde

Para o acompanhamento da evolução das trincas, também foram realizados os desenhos das mesmas. Com o auxílio de um gabarito quadriculado, passaram-se as trincas reais para um papel milimetrado e, após, para o computador. Os resultados visuais da evolução de trincamento para a Seção Teste 1 estão apresentados na figura 66. Para possibilitar a visualização das trincas do primeiro levantamento, as mesmas são apresentadas na figura 66 na cor preta. As cores dos demais levantamentos seguem a convenção da tabela 9.

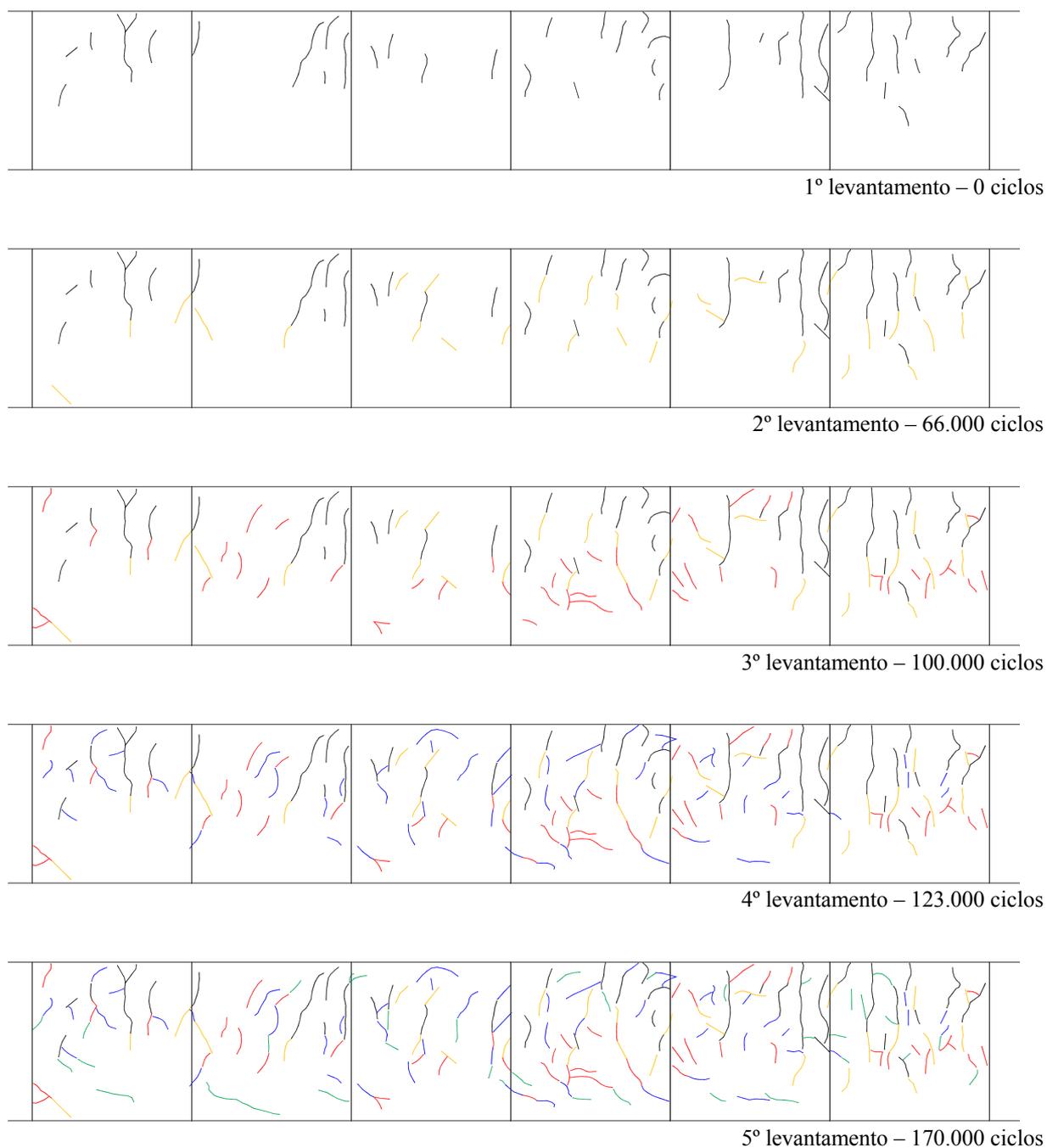


Figura 66: Evolução das trincas no pavimento da Seção Teste 1 do 1º ao 5º levantamento.

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

O resultado da evolução das trincas da Seção teste 2 pode ser conferido na figura 67, com a representação visual da pista ensaiada. Novamente para possibilitar a visualização das primeiras trincas identificadas (no terceiro levantamento), as mesmas são apresentadas na figura 67 na cor preta. As cores dos demais levantamentos seguem a convenção da tabela 9.

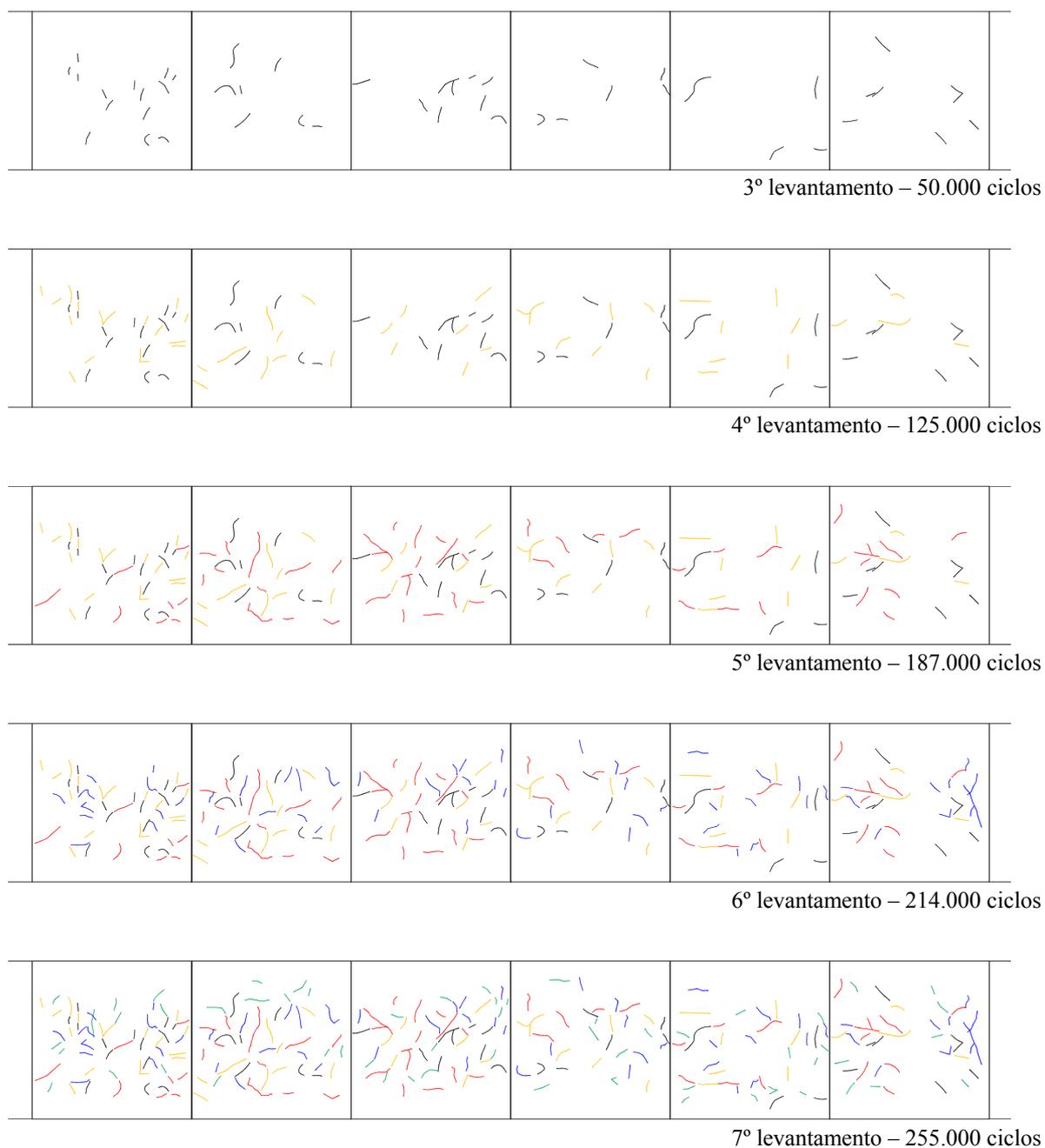


Figura 67: Evolução das trincas no pavimento da Seção Teste 2 do 3º ao 7º levantamento

Na Seção Teste 2, inicialmente não havia trincas no pavimento (ao menos aparentes na superfície), 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 (3º levantamento), como mostrado na tabela 9.

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

A figura 68 apresenta a foto da pista ensaiada com a condição final de trincamentos da Seção Teste 2.



Figura 68: Seção Teste 2, com a demarcação das trincas, após os ensaios com o simulador de tráfego estarem encerrados.

Para quantificar a evolução das trincas realizaram-se as medidas do comprimento das mesmas. Desse modo, somando as extensões de todas as trincas e dividindo essa soma pela área solicitada pelo simulador, estabeleceu-se a taxa de evolução das trincas do pavimento para as duas seções testes. Os resultados da evolução das trincas da superfície do pavimento, com a visualização gráfica das respectivas taxas de crescimento, são apresentados na figura 69.

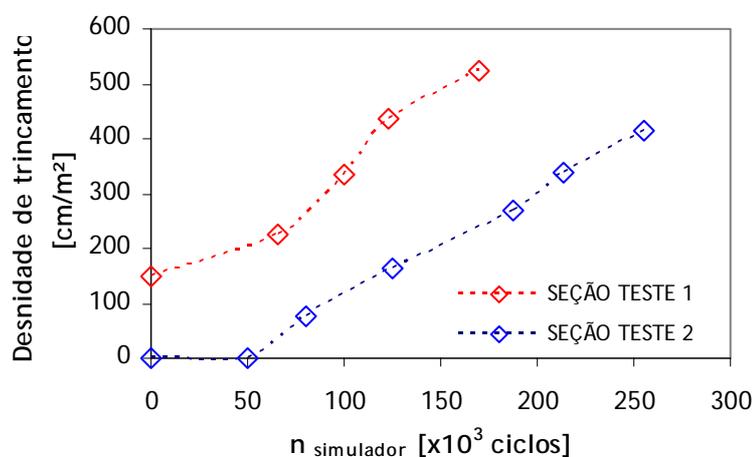


Figura 69: Evolução das trincas superficiais nos ensaios da Seção Teste 1 e 2.

Salienta-se que na Seção Teste 1 já havia uma densidade de trincamento de  $148\text{cm/m}^2$ , uma vez que esse trecho ficou sob ação do tráfego real da rodovia desde novembro de 2004 até maio de 2007, início dos ensaios, com um  $N_{AASHTO}$  aproximado de  $4,0 \times 10^6$ . Após 170.000 ciclos, no término dos ensaios nesse trecho, a superfície estava com uma densidade de trincamento de  $523\text{cm/m}^2$ , tendo ocorrido uma evolução de aproximadamente  $2,3\text{cm/m}^2$  a cada mil ciclos do simulador de tráfego.

A Seção Teste 2, por sua vez, inicialmente não apresentava trincas na superfície, pois, embora tivesse a mesma idade do primeiro trecho, não havia sido submetido ao tráfego anteriormente, uma vez que se situa no acostamento da rodovia. Nesse segundo trecho ensaiado, as trincas somente surgiram à superfície após 50.000 ciclos. Após, a evolução das trincas acompanhou a tendência do primeiro trecho, e, com uma taxa de crescimento de aproximadamente  $2,0\text{cm/m}^2$  a cada mil ciclos, encerrou os ensaios com  $415\text{cm/m}^2$  de densidade de trincamento, após 255 mil ciclos do equipamento simulador. Nota-se uma semelhança entre as taxas de crescimento

da densidade de trincamento para os ensaios das seções testes 1 e 2, embora tivessem com condições iniciais de trincamento bem diferentes.

A partir dos resultados nos dois ensaios, pode-se transladar a curva obtida na Seção Teste 1, na qual já havia trincas originadas do tráfego real da rodovia, obtendo-se o resultado da figura 70, semelhante ao formato de modelo de desempenho esperado, pela bibliografia, para o trincamento. Para obter o resultado apresentado na figura 70, ocorreu um deslocamento da curva de evolução do trincamento da Seção Teste 1 em 120mil ciclos do simulador (definidos visualmente), que representaria o tráfego exercido sobre a Seção Teste 1 desde a sua construção, em 2004, até o início dos ensaios. Comparando o número de solicitações do simulador, de 120mil ciclos, com o estimado para o tráfego real, de  $4 \times 10^6$  ciclos ( $N_{AASHTO}$ ), obteve-se, pela avaliação visual em campo, uma relação da ação do simulador igual a 33 vezes à do tráfego real.

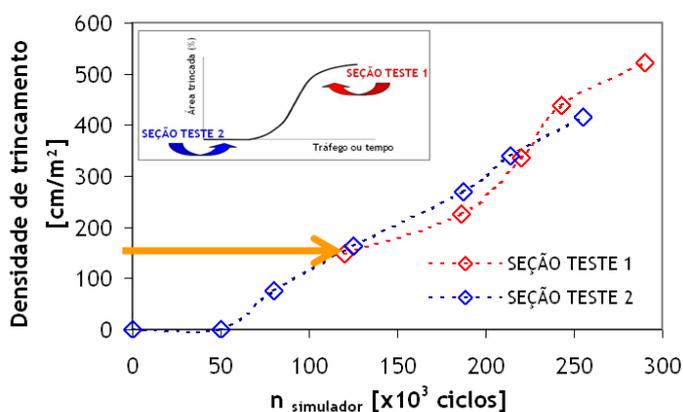


Figura 70: Comparativo da evolução das trincas superficiais nos ensaios da Seção Teste 1 e Seção Teste 2.

É válido também ressaltar que a Seção Teste 2 quase superou a densidade de trincamento final obtida no término do ensaio da Seção Teste 1. No início da pesquisa, temia-se que ao realizar os ensaios com um trecho sem ter iniciado o processo de degradação, não se atingiria níveis de trincamento suficientes para uma análise do comportamento do pavimento. 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 a Seção Teste 1 já possuía trincas, que, no decorrer do ensaio, tiveram suas larguras significativamente elevadas. Já a Seção Teste 2, embora possuísse no final dos ensaios uma significativa extensão de trincas (comprimento), todas elas possuíam larguras mínimas (da ordem de 1mm).

#### 4.1.4 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.

A figura 71 apresenta os resultados da deformação permanente obtidos nos ensaios com o simulador. Observa-se um elevado e surpreendente afundamento de trilha de roda inicial existente na Seção Teste 1, possivelmente relacionado às camadas inferiores e decorrente de processos executivos na construção da estrutura, pois após os ensaios, ao abrir um poço de inspeção no local, verificou-se que essa deformação era acompanhada por todas as camadas do pavimento. Também é um fato a ser observado a posição transversal que situa-se a Seção Teste 1, na emenda do pavimento antigo com o novo (ampliação), local que, operacionalmente, pode ser prejudicado quanto à compactação, uma vez que a ação dos rolos de compactação, se não bem controlada, pode não ser eficaz. O afundamento inicial da Seção Teste 2, que não havia sido antes dos ensaios solicitada ao tráfego, foi mínimo, desprezível, e deve-se a irregularidades construtivas. Diferentemente da Seção Teste 1, a estrutura da Seção Teste 2 situava-se no centro da largura de ampliação, não ocorrendo, portanto, dificuldades quanto à compactação na construção, justificando inclusive, assim, o diferente comportamento dessa seção (não houve elevadas deformações).

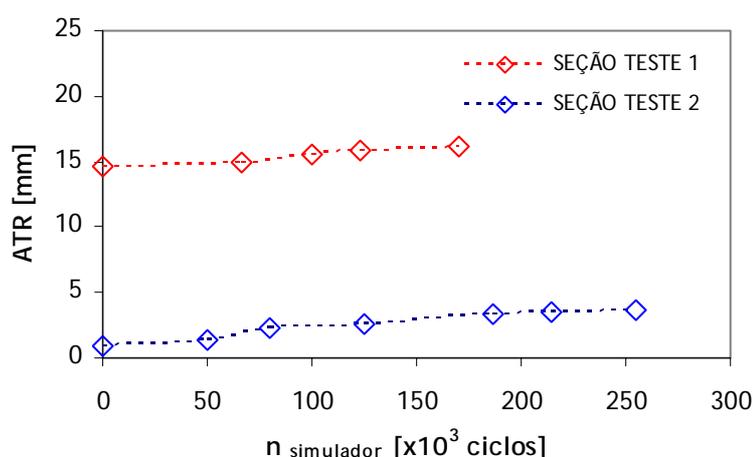


Figura 71: Evolução dos afundamentos de trilha de roda nos ensaios da Seção Teste 1 e 2.

Embora apresentem níveis de deformação diferenciados, a taxa de evolução do afundamento de trilha de roda medido para os dois trechos ensaiados foi bastante semelhante, sendo de aproximadamente 1mm a cada 100 mil ciclos.

Para esse parâmetro, não foi possível comparar os valores dos dois trechos, visto a diferença de magnitude. No entanto, ambos apresentaram uma taxa de crescimento semelhante.

#### 4.1.5 Parâmetros ambientais

##### 4.1.5.1 Temperatura do ambiente

A temperatura do ar no período dos ensaios acelerados com o simulador de tráfego foi obtida a partir de dados de estação meteorológica de Porto Alegre, com as temperaturas médias diárias. A figura 72 apresenta os dados de temperatura verificados no período.

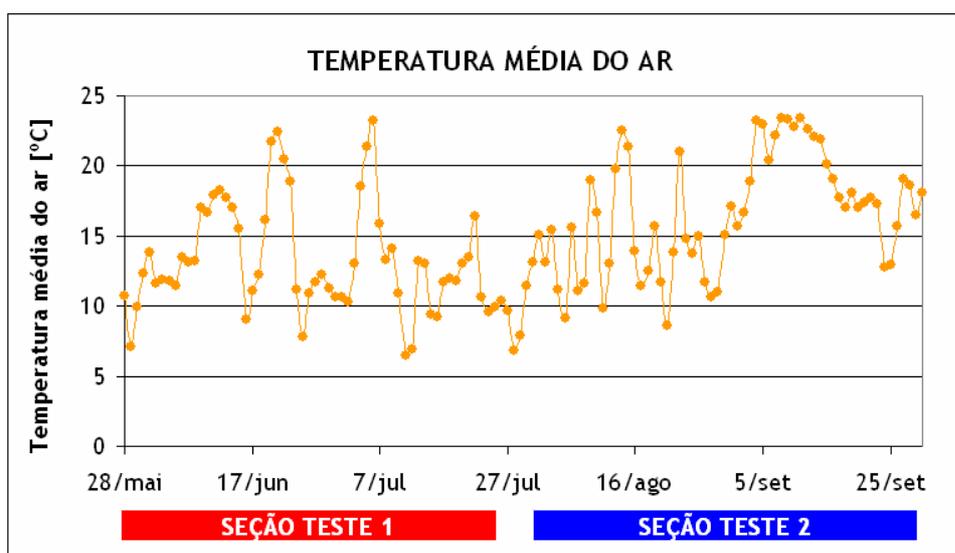


Figura 72: Temperatura média do ar durante o período de ensaios.

Para a Seção Teste 1, as temperaturas mínima, média e máxima do período de ensaios, entre 28 de maio e 26 de julho, foram, respectivamente, 10, 13 e 18 °C. Na Seção Teste 2, por sua vez, com os ensaios ocorrendo entre os dias 2 de agosto e 2 de outubro, as temperaturas mínima, média e máxima do período de ensaios foram 13, 17 e 22°C.

Considerando todo o período dos ensaios, nas duas seções testes, a temperatura média ficou igual a 15°C. Essa temperatura média geral dos dois ensaios é a que foi considerada para a



o efeito das precipitações, realizou-se um “equilíbrio hídrico” de modo que ambos os ensaios possuísem, somando-se a precipitação real e a simulada, a mesma solicitação hídrica. Para tanto, nos ensaios da Seção Teste 2, aumentou-se o tempo de simulação de chuva artificial, de modo a equilibrar as precipitações verificadas anteriormente nos ensaios da Seção Teste 1. Nos ensaios da Seção Teste 1, definiu-se acionar o simulador de precipitações durante 5 minutos a cada 1 hora, enquanto para a Seção Teste 2 esse tempo foi gradativamente aumentando quando verificado, durante os ensaios, que as precipitações no período desse segundo ensaio estavam inferiores às ocorridas no primeiro.

#### 4.1.6 Resumo dos resultados dos ensaios de campo

Os ensaios de campo com o simulador de tráfego foram realizados entre os meses de maio e outubro de 2007, solicitando a estrutura de pavimento flexível da faixa externa e do acostamento externo do km 5 da rodovia BR-290/RS, pista sentido Osório – Porto Alegre. Nesse período, duas seções testes foram ensaiadas, ocorrendo um total de 12 levantamentos, 5 para a Seção Teste 1 e 7 para a Seção Teste 2. No apêndice A são apresentados todos os resultados obtidos em cada levantamento da avaliação em campo.

No quadro da figura 74 são apresentados os resumos dos resultados obtidos nos ensaios com o simulador, destacando as quatro condições finais de pavimento verificadas no local.

	SEÇÃO TESTE 1		SEÇÃO TESTE 2	
	condição A (antes do ensaio)	condição B (após ensaio)	condição C (antes do ensaio)	condição D (após ensaio)
	$N_{\text{tráfego real}} \approx 4 \times 10^6$	$n_{\text{simulador}}: 170\text{mil}$	$N_{\text{tráfego real}} \approx 0$	$n_{\text{simulador}}: 250\text{mil}$
DEFLEXÕES [ $10^{-2}\text{mm}$ ] (Viga Benkelman)	40	51	36	47
DEFLEXÕES [ $10^{-2}\text{mm}$ ] (Deflectógrafo Digital)	30	44	28	38
ATR [mm]	14,6	16,1	0,9	3,6
Densidade de trincamento [ $\text{cm}/\text{m}^2$ ]	148	523	0	415

Figura 74: Quadro resumo das quatro condições finais do local da rodovia em que foi ensaiado o pavimento com o simulador de tráfego.

Observa-se que os valores de deflexões e trincamento no acostamento (CONDIÇÃO D) foram superiores aos da condição inicial da pista já solicitada pelo tráfego real (CONDIÇÃO A), atingindo, assim, todo o intervalo da vida de serviço do pavimento, cumprindo um dos objetivos da pesquisa com o simulador, com os ensaios nas duas seções testes. Assim, após os ensaios acelerados, é possível considerar a determinação dos parâmetros de deflexões, afundamento de trilha de roda e densidade de trincamento em quatro diferentes momentos da vida de serviço do pavimento, conforme apresentado na figura 75, com o exemplo das condições quanto ao trincamento do pavimento. Para as deflexões, também pode ser considerada essa linha de entendimento exemplificada para a densidade de trincamento.

Como observado na figura, a seqüência final das condições do pavimento poder ser ordenada da seguinte maneira: CONDIÇÃO C; CONDIÇÃO A; CONDIÇÃO D; CONDIÇÃO B.

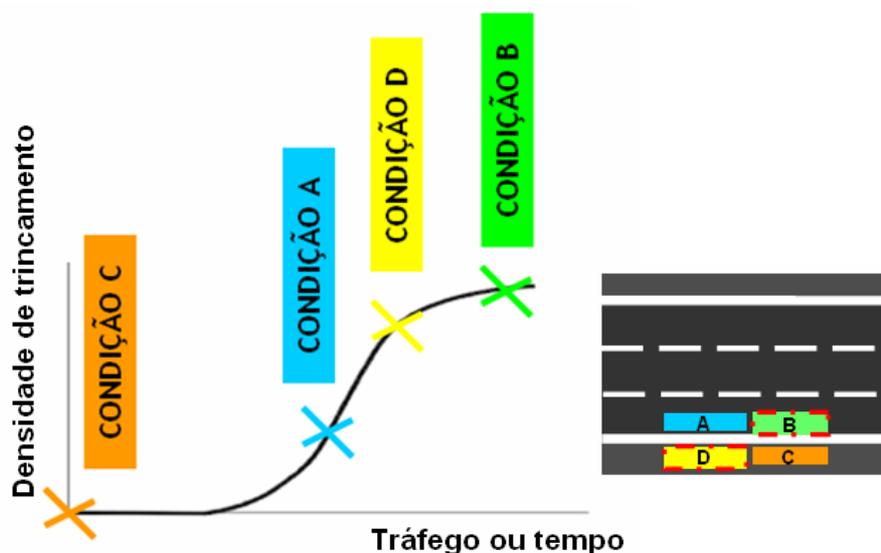


Figura 75: Seqüência das condições do pavimento após os ensaios acelerados considerando os resultados obtidos.

Outro resultado importante é a visualização das condições do trincamento antes e após cada um dos ensaios acelerados realizados (figura 76).

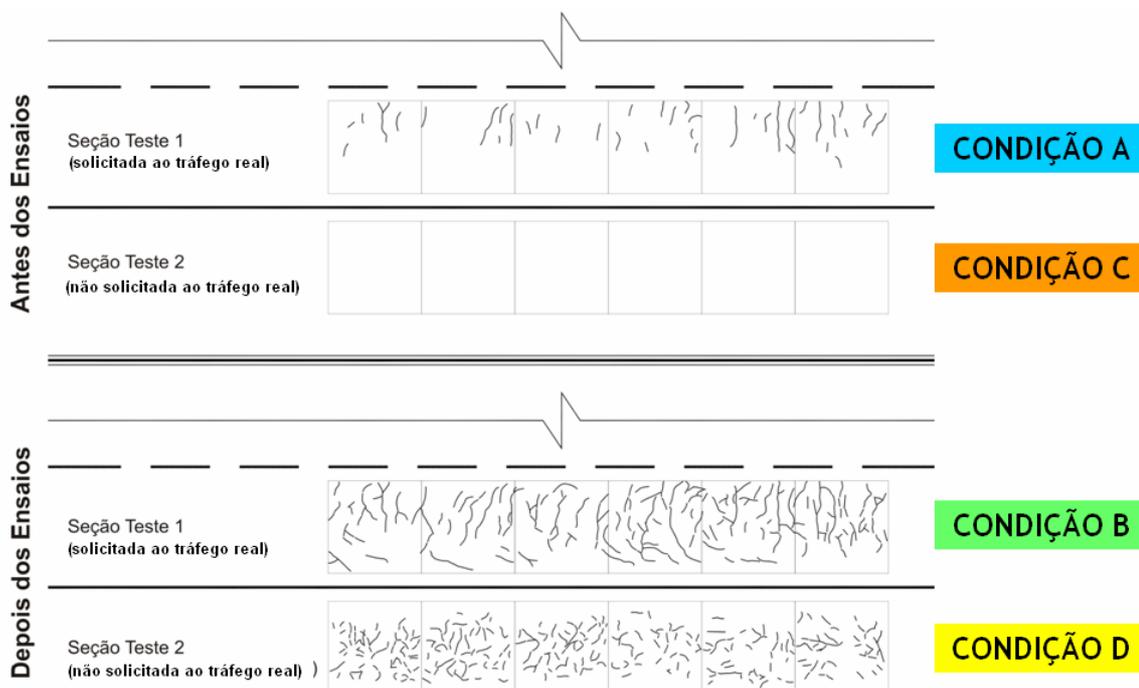


Figura 76: A superfície dos pavimentos da Seção Teste 1 e 2 antes e após os ensaios com o simulador.

## 4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Com a conclusão dos ensaios acelerados com o simulador de tráfego, o trecho da rodovia ensaiado apresentava quatro diferentes condições:

**CONDIÇÃO A:** trecho da pista já solicitado pelo tráfego real da rodovia desde a sua construção, em novembro de 2004, apresentando um  $N_{AASHTO}$  aproximado de  $4,0 \times 10^6$  -  $N_{\text{tráfego} + \text{simulador}} = (4,00) \times 10^6$ ;

**CONDIÇÃO B:** trecho da pista com a CONDIÇÃO A ensaiada pelo simulador de tráfego, com um  $n_{\text{simulador}}$  de 170mil ciclos ( $0,170 \times 10^6$ ) -  $N_{\text{tráfego} + \text{simulador}} = (4,00 + 0,170) \times 10^6$ ;

**CONDIÇÃO C:** acostamento da pista, construído em novembro de 2004, mas não solicitado pelo tráfego -  $N_{\text{tráfego} + \text{simulador}} = (0,00) \times 10^6$ ;

**CONDIÇÃO D:** trecho da pista com a CONDIÇÃO C ensaiada pelo simulador de tráfego, com um  $n_{\text{simulador}}$  de 255mil ciclos ( $0,255 \times 10^6$ ) -  $N_{\text{tráfego} + \text{simulador}} = (0,00 + 0,255) \times 10^6$ .

Para oferecer maiores ferramentas na análise da estrutura de pavimento avaliada nesta pesquisa, executou-se a extração em pista de corpos-de-prova de amostras do revestimento asfáltico dessas quatro condições, no intuito de realizar ensaios laboratoriais de resistência à tração, módulo de resiliência e de fadiga. No apêndice B são apresentados todos os resultados dos ensaios de laboratório realizados nesta pesquisa..

O pavimento analisado possui espessura de revestimento asfáltico igual a 8cm, com os 4cm inferiores sendo de asfalto convencional e os 4cm superiores de asfalto-borracha. Como para a execução dos ensaios laboratoriais propostos é necessário que os corpos-de-prova tenham altura aproximada de 5cm, desprezou-se, nos ensaios de laboratório, a parte superior da amostra extraída (cortando-a), ensaiando corpos-de-prova com os 5cm inferiores da camada asfáltica do pavimento, regulando também a face inferior, permanecendo com uma amostra com o comportamento regido pela mistura asfáltica convencional.

Com os corpos-de-prova cortados, com altura média próxima a 5cm, efetuou-se a determinação do volume de vazios. A partir dos resultados dos vazios das amostras, para cada condição dividiu-se os corpos-de-prova a serem utilizados em cada ensaio laboratorial de maneira homogênea. A tabela 10 apresenta em ordem crescente, para cada condição, os resultados do volume de vazios e o ensaio para o qual o corpo-de-prova foi designado.

Nota-se que, de modo geral, o volume de vazios é bastante variável. Caso seja considerada a média dos valores medidos, os corpos-de-prova da CONDIÇÃO C são os que apresentam o maior volume de vazios (8,06%). Isto é razoável, pois são justamente esses corpos-de-prova que não foram solicitados a nenhum carregamento, não sofrendo, portanto, nenhum aumento do grau de compactação em virtude do tráfego. Para o acostamento, inclusive não ocorreram grandes modificações nos vazios após os ensaios, conforme a média dos valores dos corpos-de-prova extraídos da CONDIÇÃO D (8,02%). A condição, no entanto, solicitada pelo tráfego real e pelo simulador (CONDIÇÃO B) foi a que apresentou, na média, os menores valores de vazios (5,19%), ocorrendo uma redução quando comparada com a condição inicial da pista (CONDIÇÃO A), submetida somente a ação do tráfego real, que apresentou na média um volume de vazios de 7,18%, valor este já inferior aos obtidos para o acostamento (sem tráfego real).

Tabela 10: Resultado dos volumes de vazios das amostras extraídas e os ensaios para as quais foram designadas.

	N° CP	VV [%]	ensaio
CONDICÃO C	21	6,50%	MR (0,1 - 15°C) e RT
	22	6,67%	MR (0,1 - 15°C) e RT
	14	7,35%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	18	7,43%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	16	7,50%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	2	7,88%	fadiga
	3	7,91%	fadiga
	1	7,99%	fadiga
	13	8,09%	apenas RT (25°C)
	12	8,09%	fadiga
	6	8,13%	fadiga
	20	8,15%	apenas RT (15°C)
	5	8,15%	fadiga
	9	8,19%	fadiga
	10	8,29%	fadiga
	11	8,31%	fadiga
	4	8,40%	fadiga
	8	8,45%	fadiga
	7	8,53%	fadiga
	17	8,58%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	15	8,77%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	19	8,98%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	23	9,05%	MR (0,1 - 15°C) e RT
CONDICÃO A	24	7,24%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	25	7,21%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	26	6,48%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	27	7,37%	apenas RT
	28	7,67%	reserva
	29	7,31%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	30	6,90%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	31	7,25%	MR (0,2 - 25°C) e RT
CONDICÃO D	32	8,00%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	33	7,95%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	34	7,71%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	35	8,10%	apenas RT
	36	7,95%	reserva
	37	8,06%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	38	8,40%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	39	8,01%	MR (0,2 - 25°C) e RT
CONDICÃO B	40	4,93%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	41	4,86%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	42	5,84%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	43	4,17%	apenas RT
	44	6,18%	reserva
	45	5,47%	MR (0,2 - 25°C) e RT
	46	4,86%	MR (0,1 - 25°C) e RT
	47	5,25%	MR (0,2 - 25°C) e RT

Para os ensaios de resistência à tração, realizados sobre corpos-de-prova das quatro condições da pista, procurou-se ensaiar amostras com o volume de vazios próximo da média dos valores encontrados para todos os corpos-de-prova de cada condição. Nos ensaios de módulo de resiliência, também executados para todas as condições da pista, selecionaram-se amostras de maneira que permanecessem, para o mesmo ensaio, corpos-de-prova com volumes de vazios superiores e inferiores à média verificada para o conjunto de amostras. Para os ensaios de fadiga, realizados somente para corpos-de-prova da CONDIÇÃO C, procurou-se ensaiar as amostras com o volume de vazios com a menor variação (próximo ao centro do intervalo de variação do volume de vazios verificado para todos os corpos-de-prova da condição considerada). No apêndice B é apresentado um maior detalhamento da divisão dos corpos-de-prova para cada ensaio laboratorial.

A partir dos resultados gerais dos ensaios em campo, verificou-se que, para o trincamento e as deflexões, a situação final dos ensaios no acostamento (CONDIÇÃO D) superou a situação inicial sobre a pista já trafegada antes dos ensaios (CONDIÇÃO A). Assim, os resultados dos ensaios de laboratório serão apresentados de acordo com a seguinte seqüência, em relação à vida de serviço do pavimento: CONDIÇÃO C; CONDIÇÃO A; CONDIÇÃO D; CONDIÇÃO B.

#### 4.2.1 Ensaios de resistência à tração

Os resultados médios da resistência à tração nas amostras de revestimento asfáltico obtidos para as quatro condições consideradas são apresentados na figura 77.

Nesses resultados de resistência à tração, definiu-se não desconsiderar nenhuma das amostras, visto que, mesmo realizando um processo estatístico de exclusão, a média dos resultados permanecia sem significativas alterações. Os resultados apresentados foram todos realizados à temperatura de 25°C (temperatura padrão para os ensaios desta pesquisa).

Observa-se, pelos resultados, que não houve uma variação contínua da resistência à tração das amostras em função da vida de serviço do pavimento, considerando a seqüência verificada nos ensaios de campo. Destaca-se, no entanto, que tanto para a Seção Teste 1 (CONDIÇÃO A e CONDIÇÃO B) como para a Seção Teste 2 (CONDIÇÃO C e CONDIÇÃO D) houve um pequeno decréscimo da resistência à tração, de 9 e 7%, respectivamente, após os ensaios acelerados serem realizados. Ou seja, há uma diferença entre os valores de cada seção teste, mas o comportamento isolado, entre cada seção teste, é semelhante. Como não há diferença

das misturas asfálticas das duas seções testes, não houve uma identificação clara dos motivos para os diferentes valores de resistência à tração verificados entre as duas seções ensaiadas.

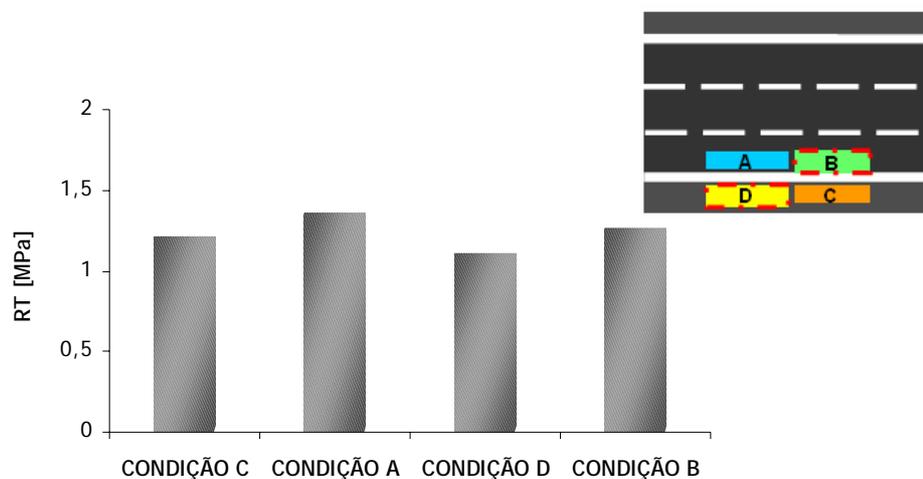


Figura 77: Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova extraídos das quatro condições finais da pista ensaiada.

## 4.2.2 Ensaios de módulo de resiliência

### 4.2.2.1 Tempo do pulso de carga de 0,1s

Os resultados do módulo de resiliência nas amostras de revestimento asfáltico obtidos considerando um pulso de forma semi-seno-verso com tempo de carga de 0,1s são apresentados na figura 78.

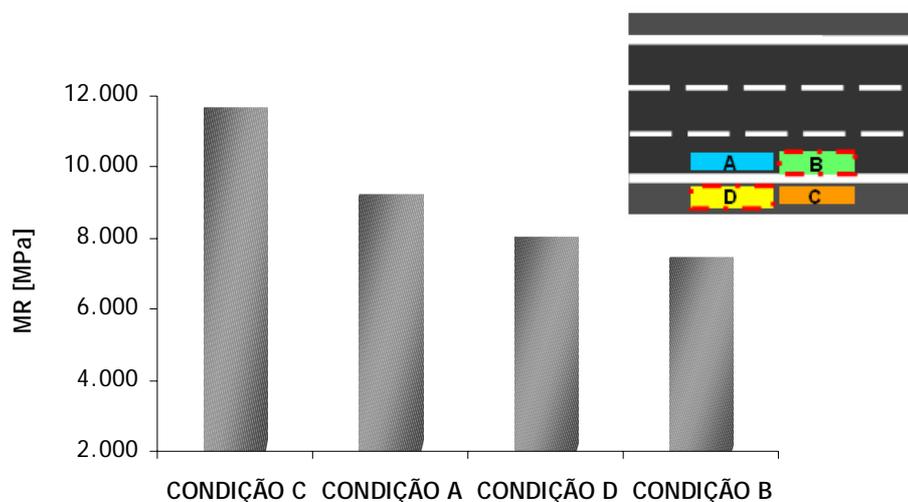


Figura 78: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com pulso de carga de 0,1s dos corpos-de-prova extraídos das quatro condições finais da pista ensaiada.

Na execução dos ensaios, realizados com a frequência de 1Hz e na temperatura de 25°C, verificou-se que algumas amostras não apresentavam comportamento satisfatório, variando significativamente os valores de módulo com o número de solicitações ou apresentando formas de curva não ideais (se afastando do formato semi-seno-verso desejado). Assim, na análise dos resultados, definiu-se considerar apenas àquelas amostras com bom comportamento durante os ensaios.

Diferentemente do verificado na análise da resistência à tração, para o módulo de resiliência observa-se uma nítida variação dos valores de módulo com a vida de serviço do pavimento. O valor obtido para a condição em que não havia, antes dos ensaios, sido submetida a nenhuma solicitação, 11.683MPa, foi de certo modo elevado, mas justificado pelo fato de o revestimento estar exposto às ações do clima (envelhecimento) por quase três anos. A evolução dos módulos em função do envelhecimento foi estudada em outras pesquisas (Tonial, 2000; Fonseca 1995). Para os ensaios desta pesquisa, a ação do clima não foi considerada, uma vez que todas as amostras foram construídas, em outubro de 2004, e extraídas de campo, em outubro de 2007, no mesmo período, sendo submetidas às mesmas ações de intempéries, como chuvas e variações de temperaturas.

#### 4.2.2.2 Tempo do pulso de carga de 0,2s

Para auxiliar na análise da influência da velocidade da aplicação de carga nos resultados desta pesquisa, realizaram-se, para as quatro condições da pista, ensaios de módulo de resiliência nas amostras de revestimento asfáltico com tempo de aplicação de carga igual a 0,2s, se aproximando do tempo de aplicação empregado pelo simulador (com velocidade de 8km/h) e considerando os resultados obtidos por Barksdale (1971).

Nos ensaios com tempo do pulso de carga de 0,2s (frequência de 1Hz e temperatura de ensaio igual a 25°C), para manter a forma semi-seno-verso, empregou-se uma maior abertura da válvula solenóide, bem como aumentou-se o volume de ar do cilindro de aplicação da carga. Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência com tempo pulso de carga de 0,2s são os apresentados na figura 79.

Assim como nos ensaios com tempo de aplicação igual a 0,1s, definiu-se utilizar apenas os resultados das amostras que apresentaram comportamento satisfatório, desconsiderando alguns resultados de ensaios obtidos.

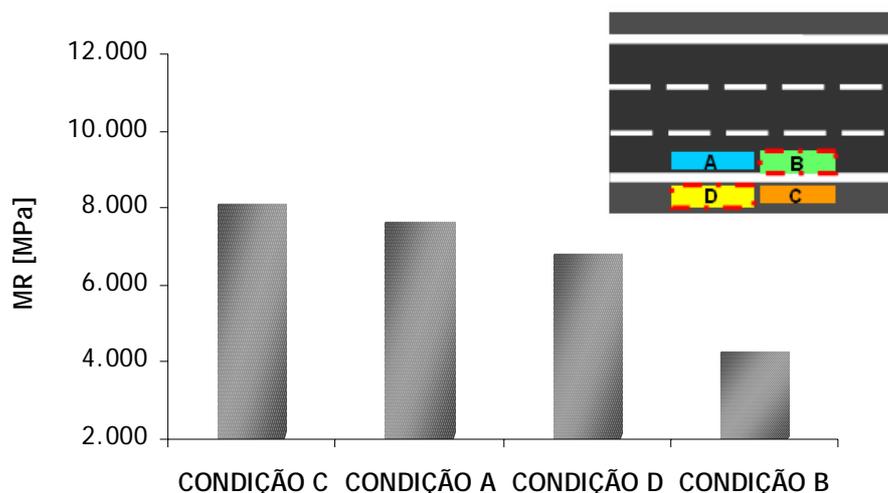


Figura 79: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com pulso de carga de 0,2s dos corpos-de-prova extraídos das quatro condições finais da pista ensaiada com o simulador de tráfego.

Observa-se que também para o tempo do pulso de carga de 0,2s o módulo de resiliência decresceu com o aumento da vida de serviço seguindo a definição de seqüência de condições estabelecida a partir dos ensaios de campo.

A figura 80 apresenta a variação do módulo de resiliência verificada entre os ensaios com tempo do pulso de carga.

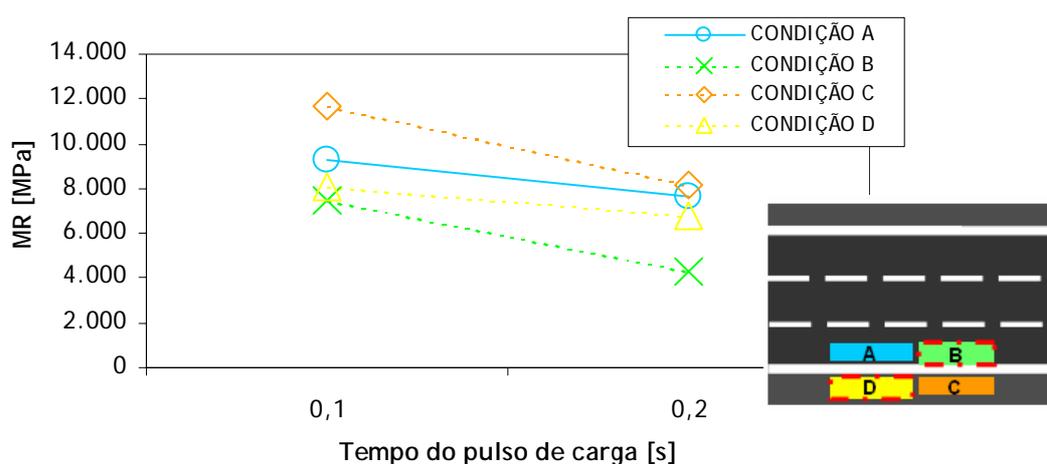


Figura 80: Variação do módulo de resiliência em função do tempo do pulso de carga para as quatro condições finais da pista ensaiada com o simulador de tráfego.

Observa-se que para todas as condições ensaiadas houve uma redução do módulo de resiliência. Para avaliar o comportamento global, determinou-se para a média dos valores de módulo das quatro condições, e a partir dessa média verificou-se que houve um decréscimo de 26% dos valores entre os tempos de aplicação de 0,1 e 0,2s.

Como discutido no capítulo 3, o tempo de aplicação de 0,1s representa, pelo estudo proposto por Barksdale (1971), a aplicação de carga de um veículo à velocidade de 25km/h (considerando camadas de revestimento com 8cm de espessura – e, portanto, a ação do tráfego a essa profundidade). Como se sabe, os veículos transitam pelas rodovias a velocidades superiores a essa. Para esta pesquisa, considerou-se que a velocidade do tráfego real é de 80km/h. Assim, assumindo também que o tempo de pulso de 0,2s representa a aplicação à velocidade de 8km/h, obteve-se, apenas como caráter ilustrativo, pois certamente o comportamento não é linear, a estimativa da variação do módulo de resiliência em função da velocidade do veículo responsável pela aplicação de carga, apresentada na figura 81.

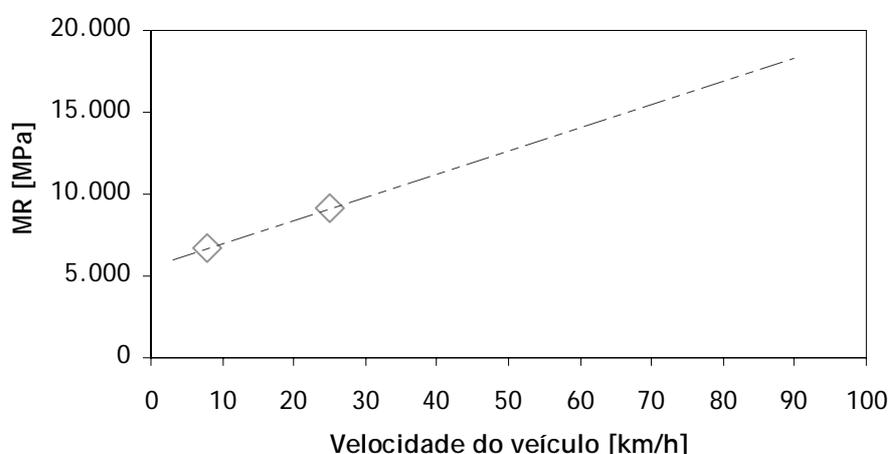


Figura 81: Estimativa da variação do módulo de resiliência em função da velocidade do veículo que exerce as cargas sobre o pavimento.

A partir dessa estimativa simplificada, verificou-se que o módulo de resiliência quando submetido à ação do simulador é da ordem de 2,5 vezes inferior ao módulo quando submetido à ação do tráfego real (80km/h).

#### 4.2.2.3 Variação do MR com a temperatura

Complementarmente, realizaram-se ensaios de módulo de resiliência nas amostras de revestimento asfáltico a diferentes temperaturas, de modo a possibilitar estimar a variação do módulo em função da temperatura, e, a partir dessa, também verificar a variação das deflexões com a temperatura, utilizando software de análises mecânicas.

Essa avaliação foi realizada somente para as amostras da CONDIÇÃO C, por ser a condição em que o pavimento não havia sido submetido a nenhuma solicitação, não havendo, portanto, influência de ações anteriores sobre as amostras. No entanto, os resultados obtidos foram abrangidos para todas as demais condições.

Além dos ensaios com a temperatura padrão de 25°C, efetuou-se, para tanto, os ensaios à temperatura média do ambiente verificada durante os ensaios acelerados em campo, que foi de 15°C. Os ensaios foram realizados com tempo de aplicação de carga de 0,1s e frequência de 1Hz.

Os resultados dos ensaios a 15°C são apresentados na figura 82, em conjunto com os já obtidos para a temperatura de 25°C. Para esses resultados, também foram excluídos os valores das amostras que, durante os ensaios, não se comportaram adequadamente (sem repetibilidade dos resultados ou com formato de curvas não coerentes).

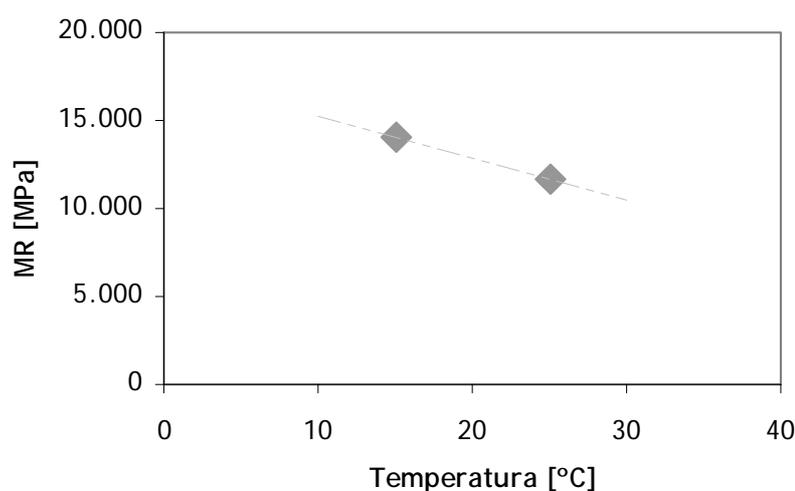


Figura 82: Variação do módulo de resiliência em função da temperatura dos ensaios.

Ingressando-se com os diferentes módulos no software *EVERSTRESS 5.0*, obteve-se a variação do deslocamento (deflexão) no topo do pavimento. Para o módulo a 15°C, 14.084MPa, calculou-se o deslocamento de  $28,8 \times 10^{-2}$ mm, enquanto que para o módulo a 25°C, 11.683MPa, obteve-se o valor de  $29,7 \times 10^{-2}$ mm para a deflexão. Considerando-se a temperatura padrão para as deflexões igual a 25°C, chegou-se aos fatores de correção das deflexões apresentado na figura 53. Nota-se que a influência da temperatura, considerando-se apenas a resposta da mistura asfáltica ensaiada, não é muito significativa. Um maior detalhamento do uso do software *EVERSTRESS 5.0* será descrito no capítulo seguinte, quando comentada a influência da velocidade de aplicação de carga na degradação dos pavimentos asfálticos, apresentando as características de todas as camadas do pavimento consideradas na análise e inseridas no software.

#### 4.2.3 Ensaio de fadiga

O trincamento pelo fenômeno da 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 (Specht, 2004).

Os ensaios de fadiga nas amostras de revestimento asfáltico nesta dissertação também foram realizados somente para a denominada CONDIÇÃO C, visto que o objetivo era estimar toda a vida do pavimento quanto à fadiga, partindo-se da situação sem nenhum carregamento sobre as amostras antes dos ensaios (sem carregamentos do tráfego real ou do simulador de tráfego).

Os modelos de fadiga desta pesquisa obtidos a partir de amostras de revestimento asfáltico extraídas da pista estão ilustrados na figura 83, obtido em função da tensão de tração, e na figura 84, em função da diferença de tensões.

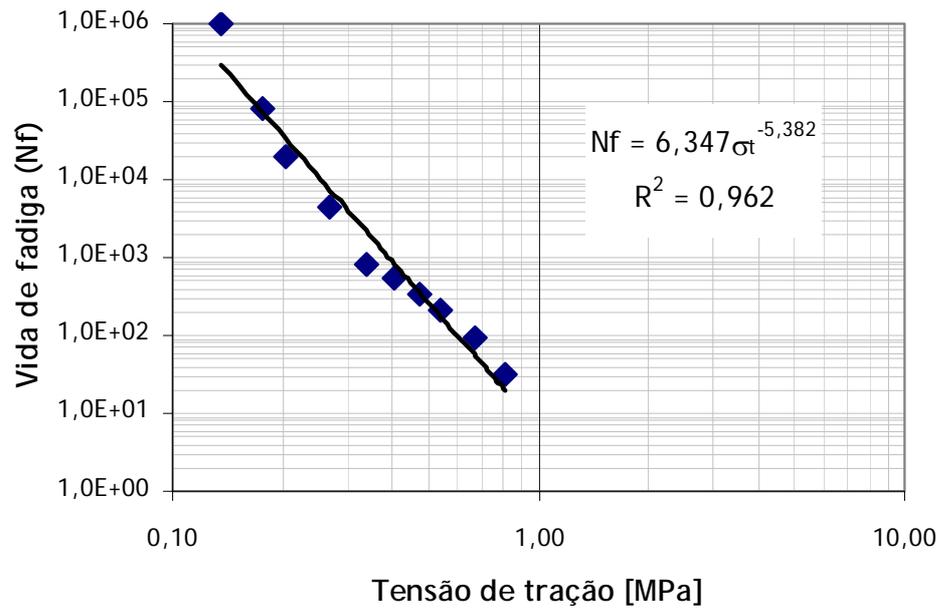


Figura 83: Modelos de fadiga em função da tensão de tração.

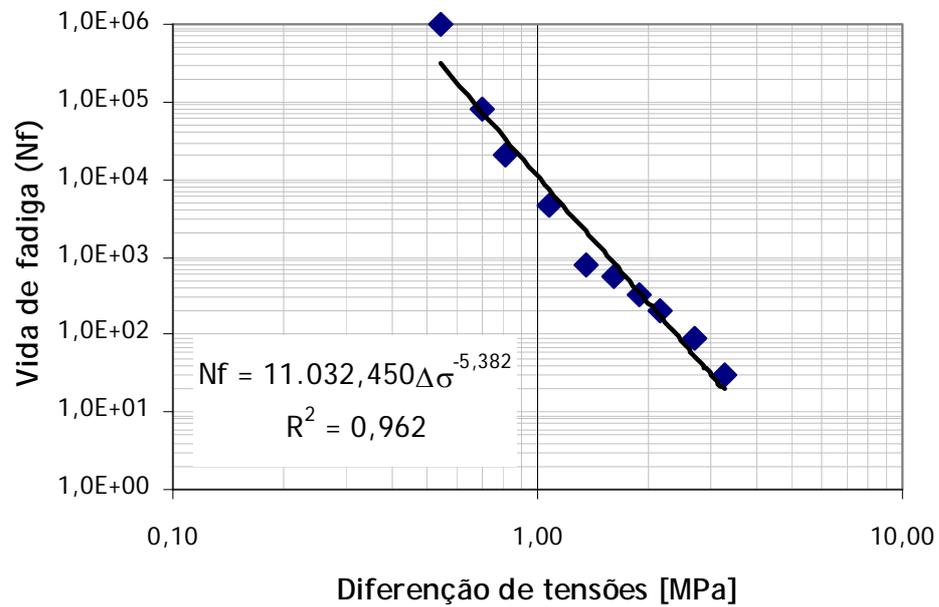


Figura 84: Modelos de fadiga em função da diferença de tensões.

A curva que representa a vida de fadiga de um material em função das solicitações aplicadas é comumente representada pelo modelo da equação 6.

$$N_f = a \times S^b \quad (\text{equação 6})$$

onde:  $N_f$  = vida de fadiga;

$S$  = solicitação;

$a$  e  $b$  = constantes do modelo.

Tayebali *et al.*, 1994, *apud* Specht, 2004, apresentam maiores detalhes sobre a modelagem matemática do fenômeno da fadiga em laboratório, bem como, modelos desenvolvidos pelo Instituto de Transportes da Universidade da Califórnia.

Observa-se que as curvas de fadiga apresentadas neste trabalho possuem forte correlação, ( $R^2=0,96$ ), sugerindo se tratar de bons modelos. No entanto, para elevados valores de tensão de tração (0,8MPa), o número de ciclos até a ruptura é bastante baixo (10 repetições somente). Esses resultados são consistentes com os obtidos em outras misturas asfálticas estudadas na região sul do Brasil (Specht, 2004; Rohde, 2007). Como tensões de tração dessa magnitude (próximas a 1MPa) não são incomuns de ocorrer nos pavimentos rodoviários, sugere-se que haja um elevado fator de correção campo-laboratório.

O elevado valor de  $b$  (-5,38) obtido nos modelos dos corpos-de-prova extraídos da pista em que foram efetuados os ensaios acelerados com o simulador de tráfego representa que a mistura considerada possui alta suscetibilidade ao estado de tensões, podendo resultar em trincamento prematuro em caso de pavimentos com espessura de camada asfáltica subdimensionada.

Na tabela 11 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados neste trabalho, a partir de corpos-de-prova extraídos da pista em que foram efetuados os ensaios acelerados com o simulador de tráfego, em conjunto com modelos determinados em estudos anteriores (Specht, 2004; Rohde, 2007).

Tabela 11: Constantes dos modelos de fadiga gerados neste trabalho e em estudos anteriores (Specht, 2004; Rohde, 2007).

mistura	Tensão de tração (MPa)			Dif. de tensões (MPa)			referência
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	
<b>corpos-de-prova extraídos da pista em que foram efetuados os ensaios acelerados desta pesquisa</b>	6,35	-5,38	0,96	11.032	-5,38	0,96	-
<b>Referência</b>	28,22	-2,93	0,98	1.640	-2,93	0,98	Specht (2004)
<i>AB 14</i>	52,91	-3,04	0,99	3.565	-3,04	0,99	
<i>AB 41</i>	87,78	-2,82	0,99	4.378	-2,82	0,99	
<i>AB 68</i>	94,00	-2,81	0,94	4.610	-2,81	0,94	
<b>AMPEVA</b>	63,41	-5,02	0,94	66.801	-5,02	0,94	Rohde (2007)
<b>RASF</b>	3.481	-4,03	0,89	926.131	-4,03	0,89	
<b>PPA 30/45</b>	139,28	-5,11	0,96	16.586	-5,11	0,96	
<b>CAP 50/70</b>	8,91	-4,09	0,93	2.573	-4,09	0,93	

No entanto, maiores comparações, quanto à fadiga, das misturas apresentadas na tabela 12 somente podem ser realizadas considerando os módulos de resiliência das misturas, uma vez que, de acordo com os valores dos módulos, a distribuição de tensões ocorre de diferentes maneiras. Misturas mais rígidas, ao absorverem tensões mais elevadas, geram tensões de tração superiores às de misturas menos rígidas.

## **5 UMA TENTATIVA DE EXTRAPOLAR OS RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS PARA O DESEMPENHO DO PAVIMENTO SOLICITADO PELO TRÁFEGO REAL**

De posse de todos os resultados dos ensaios de campo, com o simulador de tráfego, e dos ensaios de laboratório, reuniram-se dados para atingir um dos objetivos deste trabalho, que é o de propor, teoricamente, fatores relacionando a ação do simulador com a do tráfego real.

Antes, no entanto, é importante apresentar as considerações quanto à determinação do término da vida de serviço do pavimento analisado, considerando-se apenas os resultados do simulador.

### **5.1 TÉRMINO DE VIDA DE SERVIÇO DOS PAVIMENTOS ENSAIADOS**

Para realizar a análise da vida de serviço dos pavimentos ensaiados pelo simulador de tráfego nesta pesquisa, foi necessário estabelecer um critério de término de vida para os pavimentos estudados. Nesse critério, teria que ser consideradas ponderações referentes ao processo de tomada de decisões de intervenções no pavimento estabelecidas pelo administrador da rodovia, no caso a concessionária Concepa, em seu sistema de gerência de pavimentos.

Como os resultados de deflexões ao término dos ensaios tanto para o primeiro como para o segundo trecho ainda não estavam apresentando valores muito elevados, embora houvesse ocorrido uma evolução quando comparados com os iniciais, eliminou-se a hipótese de adotar as deflexões como critério de término de vida dos pavimentos. As deformações permanentes, conforme já destacado, apresentaram valores bastante diferenciados para os dois ensaios, principalmente em virtude do afundamento de trilha de roda inicial verificado na Seção Teste 1, não sendo, também, uma opção de critério a ser adotada. A evolução das trincas superficiais no pavimento, por sua vez, foi significativamente acentuada nos dois ensaios realizados, chegando, em ambos, a condições que, de acordo com o sistema de gerência do administrador, demandariam intervenções no pavimento. Assim, avaliando os resultados encontrados para ambos os trechos, definiu-se adotar como critério de término de vida de serviço dos pavimentos ensaiados o valor de 400cm/m<sup>2</sup>, instante em que as trincas superficiais

passaram a se interligar, necessitando programar uma intervenção sobre o revestimento asfáltico.

## 5.2 RELAÇÃO DOS ENSAIOS ACELERADOS COM O TRÁFEGO REAL

De acordo com o critério de término de vida de serviço estabelecido e a partir dos resultados da densidade de trincamento obtidos para os dois ensaios, o término de vida dos pavimentos foi atingido, pelo simulador, com aproximadamente 120.000 ciclos para a Seção Teste 1, conforme figura 85. Na mesma figura, observa-se que para a Seção Teste 2, o término da vida de serviço foi verificado com aproximadamente 240.000 ciclos de solicitação do simulador. Essa diferença de 120.000 ciclos ( $1,2 \times 10^5$ ) representaria o tráfego real exercido sobre o pavimento do primeiro trecho desde novembro 2004 até o início dos ensaios. Nota-se que esse número de ciclos (120.000) é o mesmo que foi obtido com a translação gráfica da densidade de trincamento, realizada no capítulo anterior. No entanto, é sabido pela contagem de tráfego que nesse período houve um volume de tráfego de aproximadamente  $4,0 \times 10^6$  ciclos de carga. Essa diferença de 33 vezes é explicada pela ação rigorosa, quanto à degradação, dos simuladores quando comparados com a ação real dos veículos, visto que os simuladores de tráfego têm como objetivo acelerar a degradação dos pavimentos, possuindo, para tanto, características específicas que aumentam significativamente a ação de carga exercida sobre a estrutura.

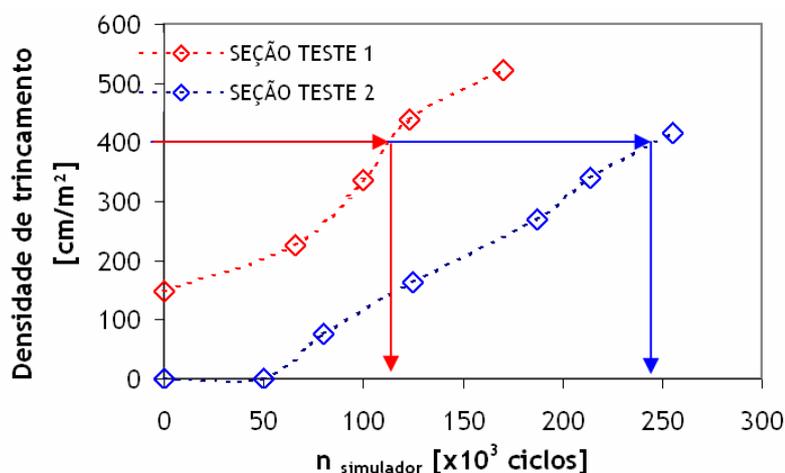


Figura 85: Verificação do número de ciclos do simulador no término da vida de serviço do pavimento para a Seção Teste 1 e 2 dos ensaios acelerados

### 5.2.1 Velocidade da aplicação da carga

As velocidades dos veículos que transitam sobre os pavimentos afetam diretamente a deformação das camadas asfálticas (Siddharthan *et al.*, 2002). E as deformações, por sua vez, são determinantes na vida de fadiga das misturas. Os simuladores de tráfego normalmente possuem velocidades do rodado significativamente inferiores às empregadas pelos veículos comerciais que trafegam pelas rodovias. Os veículos comerciais que trafegam pelas rodovias brasileiras transitam com uma velocidade próxima de 80km/h, enquanto o simulador de tráfego empregado nesta pesquisa atingia uma velocidade de aproximadamente 8km/h, 10 vezes inferior a do tráfego real.

Assim para avaliar teoricamente o efeito da baixa velocidade do simulador, seguiram-se os seguintes procedimentos:

#### ***a) Determinação da variação do módulo de resiliência da camada asfáltica em função da velocidade de aplicação da carga:***

##### *a.1) Relação do módulo do ligante*

A partir do tradicional ábaco de Van der Poel (1954), entrando-se com essas diferentes velocidades de aplicação de carga do tráfego real (80km/h) e do simulador (8km/h) e com as características médias do ligante asfáltico empregado na mistura estudada (penetração de 60 x0,1mm e ponto de amolecimento de 50°C), obteve-se um módulo de rigidez do ligante para a velocidade do simulador 6 vezes inferior ao obtido para a velocidade de tráfego.

##### *a.2) Relação do módulo da mistura*

Para chegar à variação do módulo de resiliência da mistura, a partir dessa diferença dos valores do módulo do ligante, fez-se uso do modelo da equação 7. Esse modelo, relacionando os módulos do ligante com os da mistura asfáltica, foi desenvolvido por Pinto (1991), a partir de estudo com diversas misturas asfálticas produzidas no Brasil, ensaiadas a diferentes velocidades de carregamento.

$$S_m = 67.632 \times S_b^{0,63} \quad (\text{equação 7})$$

onde:  $S_m$  = módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa);

$S_b$  = módulo de resiliência do ligante (N/m<sup>2</sup>);

De acordo com o modelo da equação 7, considerando uma diferença de 6 vezes entre os módulos do ligante, o módulo da mistura asfáltica solicitada pela velocidade do tráfego real (80km/h) foi de 3 vezes superior ao do módulo quando solicitada à velocidade do simulador (8km/h). Esse fator de relação modular ficou de certo modo próximo do estimado no capítulo anterior, igual a 2,5 vezes, ou seja, embora, como destacado na oportunidade, a relação efetuada tenha sido meramente ilustrativa, considerando uma série de suposições, o resultado experimental sugerido e o estimado teoricamente foram coerentes. Na continuidade da análise, definiu-se adotar a relação modular obtida pela análise teórica, igual a 3. Quando se está denominando esta análise como teórica, apenas se tem como objetivo destacar que a análise não é realizada a partir de resultados experimentais deste estudo. No entanto, muitas das considerações assumidas são baseadas em pesquisas empíricas anteriores, ou seja, em pesquisas não puramente teóricas.

***b) Variação das tensões-deformações com o módulo de resiliência da mistura asfáltica:***

Ingressando-se, em um programa computacional de análise tensão-deformação, com a variação no módulo da mistura asfáltica para as duas velocidades de solicitações, foi possível obter a variação, em função do módulo, das tensões e deformações da face inferior da camada asfáltica, região da camada de revestimento mais solicitada e que rege a ruptura por fadiga.

Para esta pesquisa, adotou-se o software *EVERSTRESS 5.0*, elaborado pelo Departamento de Transporte do Estado de Washington nos EUA (EVERSERIES, 2005), o qual, a partir das informações das cargas e das camadas constituintes do pavimento, apresenta a distribuição tensão-deformação para o pavimento analisado.

Com o objetivo exclusivo de avaliar a variabilidade das respostas quanto à deformação do pavimento – e não analisar os valores numéricos de resposta obtidos – adotou-se, como referência, o valor de 2.000MPa para o módulo da camada de revestimento asfáltico quando

solicitada pelo simulador de tráfego por ser esse um valor típico de módulo de resiliência de misturas asfálticas atualmente empregadas na rodovia BR-290/RS. Assim, por sua vez, o módulo da mistura nesta análise quando solicitada à velocidade do tráfego real foi, ingressando-se com o fator de 3 vezes, de 6.000MPa. Não se utilizou os valores de módulo medidos nos ensaios desta pesquisa pois eram relativamente elevados, possivelmente em virtude do tempo da ação do clima no envelhecimento das misturas.

As demais características da estrutura de pavimento considerada nessa análise mecânica estão apresentadas na tabela 12. Como o subleito local está situado a uma profundidade superior a 1m (somando as espessuras das camadas de revestimento, base, sub-base e reforço), desconsiderou-se, nesta análise mecânica, o subleito local na análise, assumindo o reforço de areia como sendo a camada mais abaixo da estrutura. Essas características foram as mesmas empregadas na análise realizada para definir a correção das deflexões a partir da temperatura da camada asfáltica.

Tabela 12: Características das camadas do pavimento consideradas na análise mecânica de tensão-deformação.

camada	material	coeficiente de Poisson	espessura [cm]	Módulo [MPa]
revestimento asfáltico	CBUQ	0,30	8	<i>var</i>
base	brita graduada	0,35	15	260
sub-base	“material primário”	0,35	30	300
subleito	areia	0,40		120

Os valores de módulo adotados na análise mecânica foram definidos a partir de estudos anteriores efetuados sobre o esse material (Casagrande, 2003) e seguindo valores de referência considerados para materiais de semelhantes características.

A partir do software *EVERSTRESS*, obteve-se os resultados de tensão e deformação para a face inferior da camada asfáltica (a 8cm de profundidade) apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Resultados da análise mecânica de tensão-deformação.

	velocidade de aplicação da carga [km/h]	Módulo [MPa]	Deformação [ $\mu$ strain]
<b>simulador de tráfego</b>	8	2.000	245
<b>tráfego real</b>	80	6.000	194

**c) Definição da vida de fadiga a partir das deformações:**

Por fim, através dos diferentes valores de deformação ( $\varepsilon$ ) obtidos para a fibra inferior da camada asfáltica, obteve-se a vida de serviço estimada a partir de curvas de fadiga de laboratório. Novamente destaca-se que o objetivo não seria obter o número de ciclos até a ruptura por fadiga para cada situação, e sim comparar a relação de número de ciclos das duas situações consideradas.

Considerando, para as deformações, um modelo de fadiga típico das misturas asfálticas brasileiras (Pinto e Preussler, 2001), apresentado na equação 8, obteve-se um  $N$  de 49 ciclos para as deformações na velocidade do simulador e de 91 ciclos para as deformações a partir da velocidade do tráfego real.

$$N_L = 1,21 \times 10^{-8} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^{2,66} \quad (\text{equação 8})$$

onde:  $N_L$  = vida de fadiga em laboratório;

$\varepsilon$  = deformações na face inferior da mistura asfáltica.

**d) Determinação do fator do efeito da velocidade de aplicação da carga:**

Com a relação da vida de fadiga obtida para diferentes velocidades de aplicação de carga (velocidade do simulador empregado na pesquisa e velocidade estimada do tráfego real da rodovia analisada), estabeleceu-se o fator do efeito da velocidade ( $F_{\text{velocidade}}$ ) apresentado na equação 9.

$$F_{\text{velocidade}} = \frac{N^{\text{v tráfego real}}}{n^{\text{v simulador}}} \quad (\text{equação 9})$$

onde:  $F_{\text{velocidade}}$  = fator do efeito da velocidade na vida de serviço das misturas asfálticas;

$N_{\text{tráfego real}}^v$  = vida de fadiga para solicitações à velocidade do tráfego real (80km/h);

$n_{\text{simulador}}^v$  = vida de fadiga para solicitações à velocidade do simulador de tráfego desta pesquisa (8km/h).

Considerando a vida de fadiga para deformações (utilizando-se a equação 9), o  $F_{\text{velocidade}}$  obtido nesta análise é de 1,86. Mais uma vez ressalta-se que este valor é considerado apenas aproximado, pois muitas estimativas e suposições foram adotadas para a sua obtenção, como já destacado.

### 5.2.2 Carga de solicitação empregada

As solicitações empregadas pelo simulador de tráfego também são mais severas que as cargas usualmente exercidas pelos veículos comerciais do tráfego real, ou, ao menos, as legalmente permitidas. Assim, também é necessário inserir na análise os fatores de equivalência de carga. O simulador desta pesquisa exerceu em ambos os ensaios uma carga de 8tf em um semi-eixo simples de rodado duplo, ou seja, 16tf em um eixo. Adotando-se os fatores de equivalência (*FEC*) da AASHTO (1993) para eixos simples de roda dupla, rerepresentado na equação 10, obteve-se, para 16tf, um fator de 18,239. Definiu-se adotar, nesta análise, os fatores de equivalência da AASHTO por serem esses os comumente empregados em considerações semelhantes a essa.

$$FEC = \left( \frac{P}{8,17} \right)^{4,32} \quad (\text{equação 10})$$

onde:  $FEC$  = fator de equivalência de carga da AASHTO;

$P$  = carga do eixo (tf);

### 5.2.3 Efeito em conjunto da velocidade e da carga de sollicitação empregada pelo simulador

Considerando o efeito em conjunto da baixa velocidade do simulador (1,86) e da elevada carga de sollicitação empregada (18,239), é obtido o fator de relação *simulador-tráfego real* apresentada na equação 11.

$$N_{\text{tráfego real}} = 34 \times n_{\text{simulador}} \quad (\text{equação 11})$$

Assim, considerando-se o tráfego real, chegou-se, para a Seção Teste 1, que o término da vida de serviço da camada asfáltica seria com um  $N_{\text{AASHTO}}$  próximo a  $4,1 \times 10^6$  e, para Seção Teste 2, com um  $N_{\text{AASHTO}}$  aproximadamente igual a  $8,2 \times 10^6$ . Nota-se que a diferença de tráfego entre as duas seções testes avaliadas ( $3,4 \times 10^6$ ) representaria o tráfego real exercido sobre o pavimento do primeiro trecho desde novembro 2004 até o início dos ensaios, valor este próximo do tráfego estimado de  $N_{\text{AASHTO}} \approx 4,0 \times 10^6$ .

## 5.3 REAPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS CONSIDERANDO O FATOR SIMULADOR-TRÁFEGO REAL

Conforme visto, o efeito da ação do simulador de tráfego na degradação do pavimento é superior ao empregado pelo tráfego dos veículos comerciais. Um ciclo do simulador de tráfego representa a sollicitação superior a de 30 rodados do tráfego real. Por esse motivo, recomenda-se o uso de simuladores na avaliação de estruturas de pavimentos, uma vez que, em um curto espaço de tempo, consegue-se submeter o pavimento até o término de sua vida de serviço.

No entanto, tão importante quanto o uso do simulador é considerar essa ação acelerada, utilizando fatores de relação como o proposto neste trabalho. Por isso, a seguir são apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios desta pesquisa considerando-se, nesse momento, não mais o número de ciclos do simulador, mas sim o número de operações solicitadas pelo tráfego real ( $N_{\text{tráfego real}}$  ou simplesmente  $N_{\text{AASHTO}}$ ), multiplicando o número de ciclos do simulador pelo fator 34, conforme equação 11. É válido também ressaltar que os

ensaios da condição inicial da Seção Teste 1 serão deslocados para o  $N_{AASHTO}$  correspondente ao período entre a construção do pavimento e o início dos ensaios acelerado ( $N_{AASHTO} \approx 4,0 \times 10^6$ ), uma vez que todos os parâmetros estarão, nessa nova apresentação, sendo relacionados ao tráfego real.

### 5.3.1 Medidas deflectométricas

Para as deflexões, considerando-se o fator de relação simulador-tráfego real, obteve-se os resultados apresentados na figura 86, para os valores de deflexões obtidos com a Viga Benkelman, e na figura 87, para os resultados a partir do Deflectógrafo Digital.

As evoluções das deflexões apresentadas nada mais são do que curvas de tendência de desempenho do pavimento flexível analisado. Essas curvas, ajustadas a uma equação, podem ser empregadas pelo gestor da rodovia em seu sistema de gerência de pavimentos, prevendo ações de intervenções e auxiliando-o na tomada de decisões.

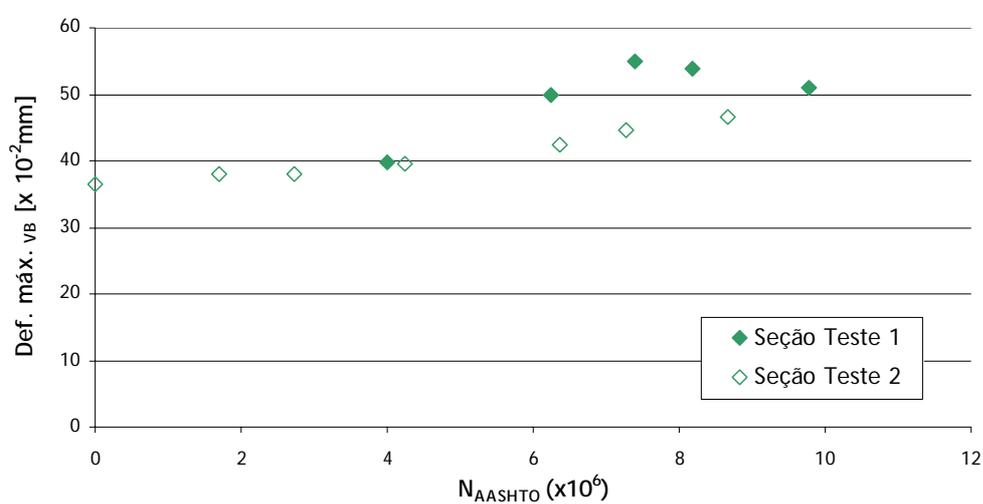


Figura 86: Evolução das deflexões do pavimento obtidas com a Viga Benkelman em função do tráfego real, a partir dos resultados dos ensaios acelerados.

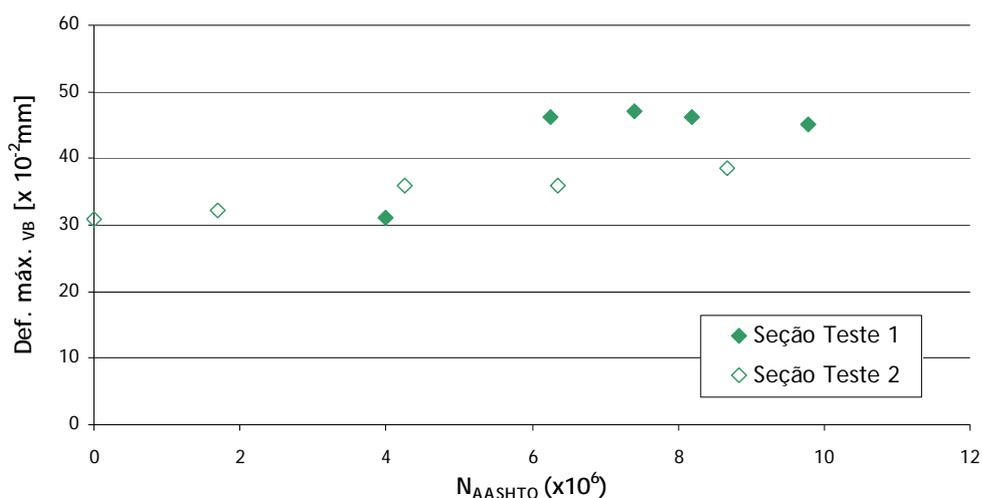


Figura 87: Evolução das deflexões do pavimento obtidas com o Deflectógrafo Digital em função do tráfego real, a partir dos resultados dos ensaios acelerados.

Vitorello (2008) realizou um estudo para a mesma estrutura de pavimento analisada nesta pesquisa (ampliação da pista da rodovia BR-290/RS no trecho entre as cidades de Osório e Porto Alegre), propondo tendências de desempenho para deflexões, irregularidade longitudinal e afundamento de trilha de roda. No desenvolvimento desse estudo, foram considerados os resultados de levantamentos obtidos para 60km de extensão da estrutura de pavimento analisada. Desse modo, adicionalmente, verificou-se como a evolução das deflexões a partir dos ensaios acelerados com o simulador de tráfego, considerando o fator *simulador-tráfego real*, se comporta em relação à linha de tendência para deflexões proposta por Vitorello (2008). Essa comparação é apresentada na figura 88. Ressalta-se haver uma série de ressalvas em relação a essa comparação, uma vez que os dados obtidos por Vitorello (2008) foram medidos com o equipamento FWD, entre os meses de setembro e dezembro (temperaturas elevadas), não havendo nenhuma correção sobre a temperatura. No entanto, observa-se, na comparação, que os dados obtidos com o simulador e os apresentados por Vitorello (2008) seguem uma similar taxa de crescimento.

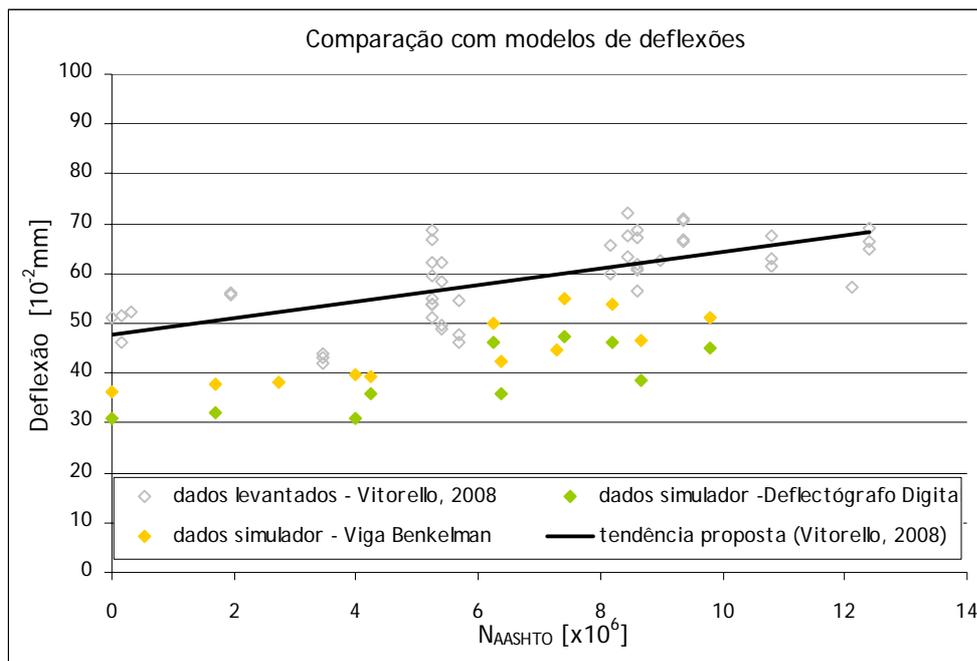


Figura 88: Comparação da curva de tendência para deflexões desenvolvida a partir dos ensaios acelerados com a proposta, para a mesma estrutura, por Vitorello (2008).

### 5.3.2 Evolução do trincamento

Para a evolução do trincamento também são apresentados, na figura 89, os resultados obtidos com o simulador corrigindo-se o número de solicitações para a ação do tráfego real.

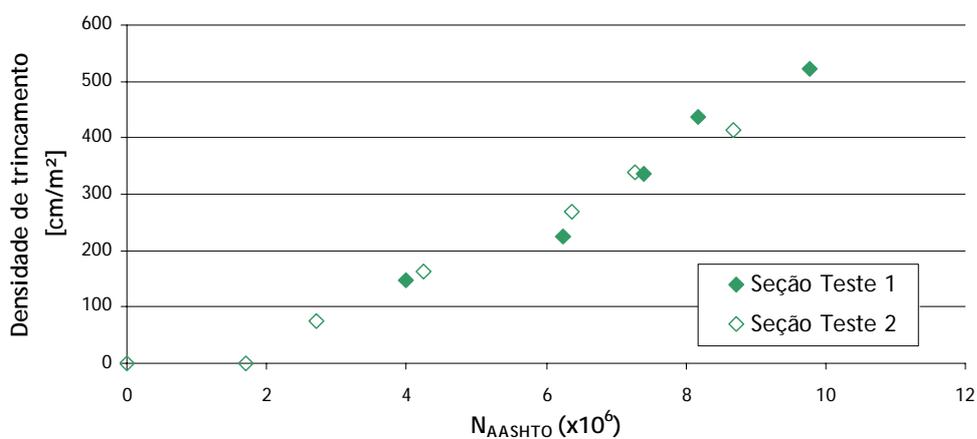


Figura 89: Evolução do trincamento em função do tráfego real, a partir dos resultados dos ensaios acelerados.

Para o trincamento, a utilização dos resultados apresentados como tendências de desempenho na gerência de pavimentos é complexa, visto que a quantificação de trincas utilizada nos ensaios (somando-se a extensão por área solicitada) não segue o procedimento de levantamentos em campo das áreas trincadas usualmente empregado e normatizado para avaliações objetivas. Por esse motivo, também não foi possível comparar os resultados obtidos com os ensaios acelerados com modelos de previsão de desempenho para área trincada encontrados na bibliografia técnica.

### 5.3.3 Deformações permanentes

Como as deformações permanentes, verificadas através da medida dos afundamentos de trilha de roda, apresentaram valores significativamente diferenciados nas duas seções testes ensaiadas, a reunião dos dados dos dois testes não foi possível de ser realizada.

Da mesma maneira, a comparação da evolução do afundamento de trilha de roda obtida a partir dos ensaios acelerados com a linha de tendência proposta para a mesma estrutura por Vitorello (2008) ficou inviabilizada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise com a máxima eficácia do desempenho de um pavimento flexível passa pela correta estimativa do comportamento futuro da estrutura. Esse tem sido um dos grandes desafios do engenheiro rodoviário, pois para realizar esta correta estimativa se faz necessária a execução de ensaios que simulem o mais fielmente possível as condições às quais as estruturas serão submetidas. Ensaios de laboratório podem ser utilizados, mas não representam a estrutura em verdadeira grandeza, o que dificulta a relação com o real comportamento. Assim, tem se empregado, ultimamente, ensaios acelerados com simuladores de tráfego, que simulam a ação do tráfego real sobre a estrutura em verdadeira grandeza, aproximando ao máximo os resultados obtidos com o real comportamento futuro do pavimento. No entanto, mesmo com o uso de simuladores, é importante haver cautela na interpretação dos resultados, visto que ainda não representam por completo a ação real, devendo, para tanto, ser consideradas relações entre as duas ações – do tráfego real e do simulador.

Para esta pesquisa, na análise da estrutura da rodovia BR-290/RS, empregou-se, para avaliar o comportamento do pavimento, um simulador de tráfego móvel, modelo HVS. Foram ensaiadas duas seções testes, uma já solicitada pelo tráfego real desde 2004 e outra, construída na mesma época, sem a ação do tráfego, situada no acostamento da rodovia. Foram efetuados ensaios em campo (deflexões, trincamento e afundamento de trilha de roda) e, complementarmente, em laboratório (resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga).

A partir da análise dos resultados de campo e de laboratório, foi possível identificar algumas conclusões, levando em consideração os objetivos principais deste trabalho. As mesmas estão descritas neste capítulo, e, após, são apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas relacionadas ao tema proposto.

### 6.1 CONCLUSÕES

Os resultados desta dissertação permitiram a avaliação do real comportamento de um pavimento flexível da rodovia BR-290/RS, possibilitando, através de medições em campo e em laboratório, juntamente com considerações baseadas em estudos anteriores a este,

estabelecer também uma relação entre a ação do simulador com a do tráfego real. A seguir, estão descritas as principais conclusões obtidas no estudo:

- a) A técnica de ensaios acelerados, através da utilização do simulador de tráfego móvel, modelo HVS, mostrou-se adequada para a avaliação do futuro comportamento da estrutura de pavimento em um curto espaço de tempo; os níveis de degradação obtidos em 2 meses de ensaios em cada seção teste analisada foram suficientes para a avaliação das condições do pavimento estudado ao longo de toda a sua vida de serviço; o simulador solicitou o pavimento a 170 mil ciclos na Seção Teste 1 e a 255 mil ciclos na Seção Teste 2, que equivaleria ao tráfego de aproximadamente 4 e 6 anos, respectivamente, considerando um  $N_{AASHTO}$  anual igual a  $1,5 \times 10^6$  (valor médio do trecho da rodovia em estudo) e aplicando o fator *simulador-tráfego real* sugerido nesta pesquisa.
- b) Para os resultados das medidas deflectométricas, obteve-se, para as duas seções testes ensaiadas, uma nítida tendência de crescimento das deflexões do pavimento quando submetido à ação do simulador, sendo esse um parâmetro indicador da redução da capacidade estrutural do pavimento;
- c) Embora o nível deflectométrico de ambas as seções no início dos ensaios fosse semelhante, na Seção Teste 1, já solicitada pelo tráfego real desde 2004, as deflexões de imediato cresceram significativamente (entre o 1º e o 2º levantamento), aumentando, tanto no levantamento com a Viga Benkelman como no com o Deflectógrafo Digital, e, após, permaneceram no mesmo patamar; na Seção Teste 2, por sua vez, a evolução com o acréscimo do nível deflectométrico foi verificada de modo gradativo ao longo dos levantamentos;
- d) Foi identificada uma rápida evolução da densidade de trincamento tanto na Seção Teste 1, que já apresentava um nível de trincamento inicial de  $148\text{cm/m}^2$ , como na Seção Teste 2, sem nenhuma trinca no início dos ensaios, evidenciando a ação do simulador de tráfego; em ambas as seções, a taxa de crescimento da densidade de trincamento foi semelhante. No término dos ensaios, a Seção Teste 1 e a Seção Teste 2 apresentavam uma densidade de trincamento de  $523\text{cm/m}^2$  e  $415\text{cm/m}^2$ ;
- e) Na Seção Teste 1, já solicitada pelo tráfego real antes dos ensaios, observou-se que inicialmente as trincas eram somente transversais e não estavam interligadas; com a evolução dos ensaios, a maioria das trincas passaram a se estender em comprimento até ocorrer a

interligação dessas (comportamento já esperado); as trincas da Seção Teste 2, não solicitada pelo tráfego antes dos ensaios acelerados, surgiram, por sua vez, isoladas, sem uma forma muito clara de entrelaçamento;

f) As trincas somente surgiram no pavimento da Seção Teste 2 a partir dos 50mil ciclos do simulador, que representaria, adotando o fator sugerido no estudo, um  $N_{AASHTO}$  próximo de  $1,7 \times 10^6$  (alcançado, no trecho da rodovia em estudo, em um pouco mais de 1 ano de tráfego); o nível de trincamento inicial da Seção Teste 1 (já solicitada anteriormente pelo tráfego real) somente foi atingido na Seção Teste 2 após 120mil ciclos, que representaria o período de tráfego entre a construção do pavimento até o início dos ensaios acelerados. Como estima-se que nesse período o pavimento tenha sido solicitado por  $4 \times 10^6$  ciclos ( $N_{AASHTO}$ ), de acordo com essa avaliação visual, a relação entre o número de ciclos do tráfego real com a do simulador é igual a 33;

g) O elevado afundamento de trilha de roda inicial verificado na Seção Teste 1, possivelmente devido a questões executivas de construção do pavimento, impossibilitou realizar análises comparativas aprofundadas entre os dois ensaios acelerados efetuados, apenas observou-se que, embora defasadas por esse elevado afundamento inicial da Seção Teste 1, em ambas as seções testes os afundamentos de trilha de roda evoluíram com uma similar taxa de crescimento (1mm a cada 100mil ciclos do simulador);

h) Os resultados dos ensaios de resistência à tração nas amostras de revestimento asfáltico realizados em corpos-de-prova extraídos da pista no local dos ensaios acelerados mostraram que não houve uma variação significativa desse parâmetro quando submetido a diferentes níveis de solicitações (do tráfego real e do simulador);

i) Para os ensaios de módulos de resiliência nas amostras de revestimento asfáltico, por sua vez, foi identificado nos dois procedimentos de ensaios realizados (tempo de pulso de carga de 0,1s e de 0,2s) um decréscimo dos valores de módulo com o acréscimo das solicitações (tráfego real e simulador), evidenciando a degradação com a ação de cargas; tal resultado é extremamente coerente, visto que, em campo, foi verificada uma acentuada densidade de trincamento em ambas as seções ensaiadas, bem como um crescente nível de deflexões;

j) Na comparação dos ensaios de módulo de resiliência nas amostras de revestimento asfáltico com diferentes tempos de aplicação de carga, observou-se um pequeno decréscimo do módulo com o aumento do tempo de solicitação, que representa, também, um acréscimo dos valores

de módulo com o aumento da velocidade de aplicação de carga (velocidade do veículo ou simulador);

l) A partir de considerações e resultados estabelecidos em estudos anteriores, avaliou-se a influência da velocidade da carga (e o conseqüente tempo de aplicação) na degradação do pavimento; considerando que o simulador trabalhou com uma velocidade de 8km/h e o tráfego real transita a uma velocidade próxima a 80km/h, estimou-se que, somente pela diferença da velocidade, a ação do simulador é da ordem de 1,86 vezes superior a da ação do tráfego real;

m) Com o efeito da velocidade nos resultados estabelecido e considerando-se também o efeito da carga empregada pelo simulador, superior a da maioria dos veículos que trafegam pela rodovia (adotando fatores de equivalência (*FEC*) da AASHTO (1993)), foi obtida a seguinte relação entre a solicitação do simulador de tráfego e a do tráfego real para os ensaios desta pesquisa:  $N_{\text{tráfego real}} = 34 \times n_{\text{simulador}}$ ; essa relação ficou próxima da identificada visualmente em campo a partir do trincamento (33 vezes). Devido a incertezas em algumas considerações realizadas, pode-se estimar que a ação do simulador seja da ordem de 30 a 40 vezes mais severa que a ação do tráfego real;

n) Adotando como critério de término de vida de serviço a condição do pavimento que apresente densidade de trincamento de 400cm/m<sup>2</sup>, chegou-se, para a Seção Teste 1, a uma vida residual de  $4,1 \times 10^6$  veículos comerciais ( $N_{\text{AASHTO}}$ ), e, para Seção Teste 2, a uma vida de serviço igual a  $8,2 \times 10^6$  ( $N_{\text{AASHTO}}$ ); a diferença de tráfego entre as duas seções testes avaliadas ( $4,1 \times 10^6$ ) representaria o tráfego real exercido sobre o pavimento da Seção Teste 1 desde novembro 2004 até o início dos ensaios, muito próximo do estimado pela contagem de tráfego existente na rodovia ( $4,0 \times 10^6$ );

o) O  $N_{\text{AASHTO}}$  para o término da vida de serviço obtido no local dos ensaios para a estrutura avaliada ( $8,2 \times 10^6$ ) é inferior a 50% do previsto em projeto ( $1,8 \times 10^7$ ), condizente com a real condição do pavimento do local, em que, com menos de 3 anos de tráfego, está próximo de necessitar de uma intervenção; tal resultado reforça a necessidade de se reavaliar os métodos de projetos adotados nos pavimentos brasileiros e a importância de se utilizar de ferramentas eficazes na avaliação do real futuro comportamento dos pavimentos, com o uso, por exemplo, de simuladores de tráfego.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para a continuidade das análises elaboradas e discutidas nesta pesquisa, pode-se indicar:

- a) Comparar a ação do simulador com a do tráfego real em outras estruturas, até mesmo retornando aos locais ensaiados anteriormente (em outros estudos) pelo simulador móvel desta pesquisa, avaliando se o comportamento real está seguindo os estimados pelos ensaios acelerados, levando em consideração a ação da velocidade e da carga aplicada, como proposto neste trabalho;
- b) Extrair corpos-de-prova de locais da rodovia submetidos ao tráfego real com diferentes idades (e, conseqüentemente, diferentes solicitações), verificando como os módulos de resiliência se comportam com a ação do tráfego (validando os resultados obtidos neste trabalho) e ressaltando também o efeito do envelhecimento (causado pela ação climática), não considerada na análise desta pesquisa;
- c) Realizar sobre a mistura asfáltica analisada ensaios de módulo de resiliência a outros tempos de pulsos de carga, avaliando se os resultados obtidos para outros tempos seguem a tendência identificada para os tempos de 0,1s e 0,2s;
- d) Dar continuidade à comparação dos ensaios obtidos com o simulador de tráfego com o desempenho real identificado em campo para a mesma estrutura avaliada, a partir de levantamentos periódicos de monitoração, auxiliando, assim, as tomadas de decisões do sistema de gerência do gestor da rodovia;
- e) Estudar e desenvolver fatores relacionando os resultados de ensaios de laboratório – como o de fadiga – com os obtidos em ensaios acelerados com simuladores, integrando-os ao estimado e proposto neste estudo, relacionando o comportamento do pavimento nos ensaios acelerados com o verificado quando solicitado pela ação do tráfego real.

## REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **Guide for design of pavement structures**. Washington, D.C., 1993.

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.

ALBANO, J. F. **Efeitos da Variação de Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento**. Dissertação de Mestrado, PPGE/UFGRS. Porto Alegre, RS, 1997.

ALBANO, J. F. **O Excesso de Carga e de Pressão dos Pneus nas Rodovias**. ABCR: 1.ed. São Paulo: CL-A Comunicações e Editora, 1999.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos Excessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos**. Tese de Doutorado, PPGE/UFGRS. Porto Alegre, RS, 2005.

ALBERNAZ, C. V. **Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a partir da Bacia de Deflexão**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ANFAVEA - Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira - 2007**. São Paulo, SP, 2007. Disponível em: [www.anfavea.com.br](http://www.anfavea.com.br). Acesso em: 15 de maio de 2008.

**ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL**. Secretaria da Coordenação e Planejamento. Estado do Rio Grande do Sul, 1997. Disponível em: [www.scp.rs.gov.br](http://www.scp.rs.gov.br). Acesso em: 27 de dezembro de 2007.

AUTOVIAS. **Trecho experimental – Simulador de Tráfego**. Relatório Final – Dynatest. São Paulo, SP, 2004.

AZAMBUJA, D. M. **Estudo de Recapeamentos Asfálticos de Pavimentos Através de Ensaios Acelerados**. Dissertação de Mestrado, PPGE/UFGRS. Porto Alegre, RS, 2004.

BARKSDALE, R. D. **Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing**. Highway Research Record 345, Highway Research Board. Washington D.C, 1971.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras/ABEDA. Rio de Janeiro, RJ, 2007.

BORGES, C. B. S. **Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FWD em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. UFSC, Florianópolis, SC, 2001.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral Sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado, PPGE/UFGRS. Porto Alegre, RS, 2006.

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.

CASAGRANDE, F. L. **Estudo da Influência do Teor de Finos na Condutividade Hidráulica e Deformidade Elástica de Brita**. Dissertação de Mestrado, PPGE/UFGRS. Porto Alegre, RS, 2003.

CERATTI, J. A. P., *et al.* **A Fullscale Study of Rutting of Thin Pavements**. Transportation Research Board, 79th Annual Meeting. Washington, DC, 2000.

CERATTI, J. A. P.; NUÑEZ, W. P.; GEHLING, W. Y.; OLIVEIRA, J. **A Full-Scale Study of Rutting of Slender Pavements**. *In: 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2000, Washington, DC. Washington, DC, 2000.*

CERATTI, J. A. P. **Equipamento para Teste Acelerado de Pavimentos**. *In: COPPEGEO'93, 1993. Rio de Janeiro, RJ, 1993.*

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa Rodoviária 2007: Relatório Gerencial**. Brasília, DF, 2007. Disponível em: [www.cnt.org.br](http://www.cnt.org.br). Acesso em: 15 de maio de 2008.

CORTÉ, J-F. **Development and Uses of Hard Grade Asphalt and of High Modulus Asphalt Mixes in France**. Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous Pavements, Washington, DC, n. 503, 2001.

CRUZ, L. L. **Estudo Comparativo do Desempenho de um Recapeamento Utilizando Asfalto Borracha em Pavimento Flexível**. Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS, 2005.

CONCEPA. **Arquivos e documentos cedidos pela Concessionária da Rodovia Osório – Porto Alegre S/A – Concepa**. 2007.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente**. DNER-ES 303/97. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Determinação das Deflexões Pela Viga Benkelman**. DNER-ME 024/94. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Determinação da Densidade Aparente de Misturas Betuminosas**. DNER-ME 117/94. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas**. DNER-ME 133/94. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Misturas Betuminosas**. DNER-ME 138/94. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre. **Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi – Rígidos**. DNIT-PRO 006/2003. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

E-CORE. **European Construction Research Network**. Disponível em: <http://e-core.cstb.fr>. Acessado em 27/06/2008.

EVERSERIES. **EVERSERIES© USER’S GUIDE - Pavement Analysis Computer Software and Case Studies**. Washington State Department of Transportation, Washington, DC, 2005.

FONSECA, O. A. **Development of a Time-Dependent model for the Dynamic Modulus of Asphalt Mixes**. Tese (Ph.D. dissertation), University of Maryland, Maryland, USA, 1995.

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.

FHWA - Federal Highway Administration. **Pavement Testing Facility**. Disponível em [www.fhwa.dot.gov/pavement/utwweb/facilit.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/pavement/utwweb/facilit.cfm). Acesso em: 22 de agosto de 2008.

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. **Anuário Estatístico dos Transportes 2001**. Brasília, DF, 2001. Disponível em: [www.geipot.gov.br](http://www.geipot.gov.br). Acesso em: 26 de Dezembro de 2007.

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.

**GUIA 4 RODAS - 2008**. Editora Abril. Disponível em: [viajeaqui.abril.com.br/g4r](http://viajeaqui.abril.com.br/g4r). Acesso em: 29 de julho de 2008.

HORAK, E. et al. **The Impact and Management of the Heavy Vehicle Simulator (HVS) Fleet in South Africa**. 7th International Conference on Asphalt Pavement, 1999.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2nd Ed. New Jersey: Prentice Hall. 2004.

JOHNSTON, M. G.; BIANCHINI, M. R.; PASSOS, M. C. F. P. **Simulação de Tráfego nas Pistas Experimentais da RS/122 - Asfalto Borracha Versus Asfalto Convencional**. In: 18º Encontro do Asfalto - IBP. Instituto Brasileiro do Petróleo, Rio de Janeiro, 2006.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Análise do Pulso de Carga em Pavimentos**. In: 29a Reunião Anual de Pavimentação, p. 418 – 449. Cuiabá, MT, 1995.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ed: Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005

MERIGHI, J. V. **Utilização de Simulador de Tráfego para Análise de Comportamento de Misturas Asfálticas**. 29a Reunião Anual de Pavimentação, p. 304 – 316. Cuiabá, MT, 1995.

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

NÚÑEZ, W. P. **Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários com Basaltos Alterados.** Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1997.

**PER - PROGRAMA DE EXPLORAÇÃO DA RODOVIA – Revisão nº 15.**  
Concessionária da Rodovia Osório – Porto Alegre S/A. Porto Alegre, 2005.

**PER - PROGRAMA DE EXPLORAÇÃO DA RODOVIA.** Engenharia, consultoria e economia S/A. Rio de Janeiro, 1994.

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

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis.** 2.ed: Copiarte, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

PREUSSLER, E. S. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos de um Solo Arenoso.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1978.

ROHDE, Luciana. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos.** Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS, 2007.

SÁ, M. F. P. **Influência 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.

SCHMITZ, C. S. **Análise do Comportamento Estrutural de Sistemas de Drenagem Viária por Tubos Plásticos Flexíveis Envolvidos por Areia.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2002.

SIDDHARTHAN, R. V.; KRISHNAMENON, N.; EL-MOUSLY, M.; SEBAALY, P. E. **Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response.** Journal of Transportation Engineering. 2002.

SILVA, P. D. E. A. **Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (WHITETOPPING) na Pista Circular Experimental do Instituto e Pesquisa Rodoviária.** Tese D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

SPECHT, L. P.; KILPP, R.; CAMPOS, M. **Contribuição a Previsão de Temperatura em Pavimentos Flexíveis.** In: III Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2005, Passo Fundo. 2005.

SPECHT, L.P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2004.

TONIAL, I. **Efeito do Envelhecimento de Camadas Asfálticas de Diferentes Espessuras na Vida de Fadiga do Pavimento.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

TAYEBALI, A. A.; DEACOM, J. A.; COPLANTZ, J. S.; FINN, F. N.; MONISMITH, C. L. **Fatigue Responses of Asphalt-Aggregate Mixes.** Strategic Highway Research Program. 1994.

TRB - Transportation Research Board. **Full Scale and Accelerated Pavement Testing - Committee AFD40.** Disponível em: [www.k-state.edu/pavements/trb/A2B09](http://www.k-state.edu/pavements/trb/A2B09). Acesso em: 25 de outubro de 2006.

VAN DER POEL, C. A. **General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data.** Journal of Applied Chemistry, vol 4, 1954. 221p.

VIEIRA, C. S. **Desempenho de um Pavimento Flexível Solicitado por Simulador de Tráfego.** Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, 2002.

VITORELLO, T. **Análise de Desempenho de Estrutura de Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS no Trecho Osório - Porto Alegre.** Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, 2008.

WICKBOLDT, V. S. **Ensaio Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos.** Dissertação de Mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

## **APÊNDICE A – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EM CAMPO**

**SEÇÃO TESTE 1**

Data: 28/05/07

n° ciclos: 0

Temp. revest. [°C]: 17,4

**Área trincada [cm/m²]**

148

**Viga Benkelman**

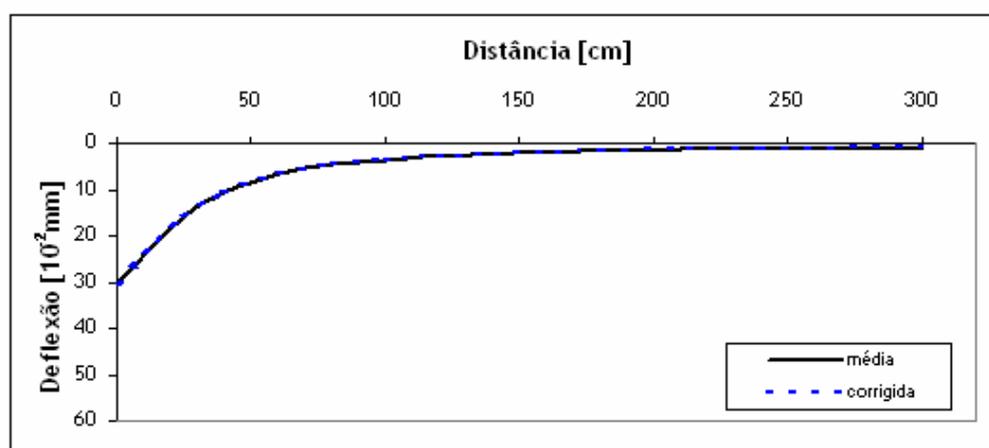
	deflexão [ $10^{-2}$ mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	36	34	36	35
S2	38	40	40	39
S3	40	40	40	40
S4	40	42	40	41
S5	40	40	38	39
<b>deflexão média [<math>10^{-2}</math> mm]</b>				<b>39</b>
<b>deflexão média corrigida [<math>10^{-2}</math> mm]</b>				<b>40</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR [mm]
S1	15,0
S2	15,0
S3	13,0
S4	15,0
S5	15,0
<b>média</b>	<b>14,6</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [ $10^{-2}$ mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	31	29	23	35	33	30	31	
25	16	17	12	16	17	16	16	
40	11	12	8	11	10	10	11	
60	7	9	4	7	6	7	7	
80	5	6	3	5	4	5	5	
100	4	5	2	4	3	4	4	
120	3	4	1	3	2	3	3	
180	2	3	1	2	1	2	2	
240	1	2	0	1	1	1	1	
300	1	1	0	1	0	1	1	
<b>Raio de curvatura [m]</b>	<b>216</b>	<b>251</b>	<b>283</b>	<b>167</b>	<b>194</b>	<b>215</b>	<b>210</b>	



**SEÇÃO TESTE 1**

Data: 05/07/07  
 n° ciclos: 66.000  
 Temp. revest. [°C]: 28,5

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

226

**Viga Benkelman**

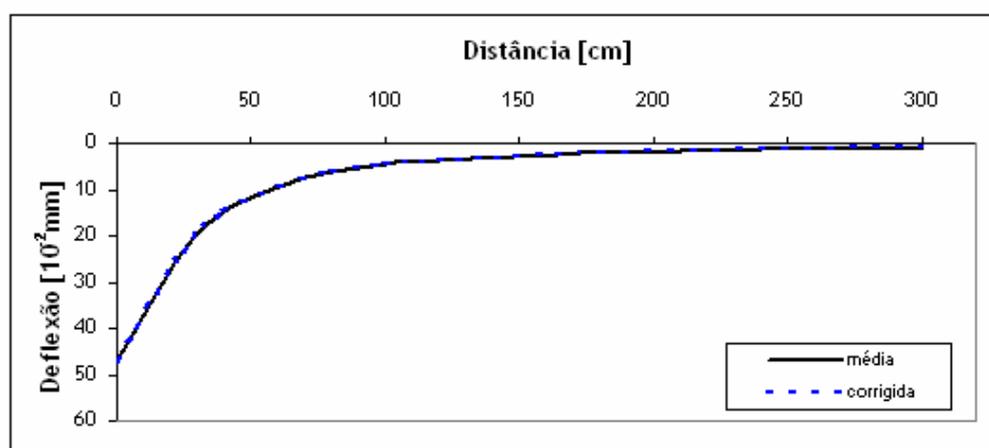
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	48	48	46	47
S2	54	52	52	53
S3	48	48	40	45
S4	54	60	58	57
S5	50	52	50	51
deflexão média [10 <sup>-2</sup> mm]				51
deflexão média corrigida [10 <sup>-2</sup> mm]				50

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	14,0
S2	15,5
S3	14,0
S4	15,0
S5	16,0
média	14,9

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	37	46	52	50	49	47	46	
25	17	20	28	25	26	23	23	
40	11	13	18	16	16	15	15	
60	7	8	11	10	10	9	9	
80	5	5	8	7	7	6	6	
100	4	4	6	5	5	5	5	
120	3	3	4	4	4	4	4	
180	2	2	2	2	2	2	2	
240	1	1	2	1	1	1	1	
300	1	1	1	1	1	1	1	
Raio de curvatura [m]	158	121	128	122	131	131	133	



**SEÇÃO TESTE 1**

Data: 12/07/07

n° ciclos: 100.000

Temp. revest. [°C]: 13,9

**Área trincada [cm/m²]**

336

**Viga Benkelman**

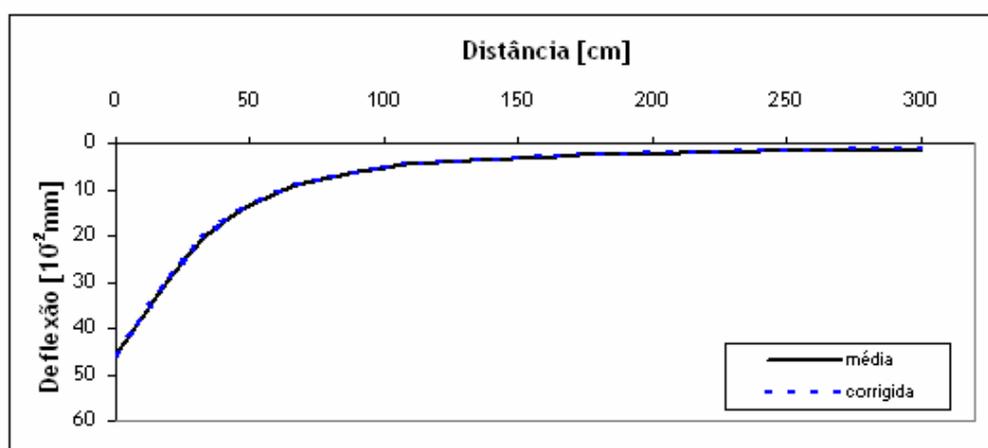
	deflexão [ $10^{-2}$ mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	52	52	52	52
S2	62	58	56	59
S3	58	56	40	51
S4	50	52	52	51
S5	52	52	52	52
deflexão média [ $10^{-2}$ mm]				53
deflexão média corrigida [ $10^{-2}$ mm]				55

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	16,0
S2	16,0
S3	15,5
S4	15,5
S5	14,5
média	15,5

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [ $10^{-2}$ mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	45	44	45	47	46	46	47	
25	25	24	25	25	28	26	27	
40	16	16	19	16	19	17	18	
60	10	10	13	10	12	11	11	
80	7	6	10	6	8	7	8	
100	5	5	8	5	6	5	6	
120	4	3	7	3	4	4	4	
180	2	2	4	2	2	2	2	
240	1	1	3	1	1	2	2	
300	1	1	2	1	1	1	1	
Raio de curvatura [m]	155	159	161	139	172	157	151	



**SEÇÃO TESTE 1**

Data: 17/07/07

n° ciclos: 123.000

Temp. revest. [°C]: 17,5

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

438

**Viga Benkelman**

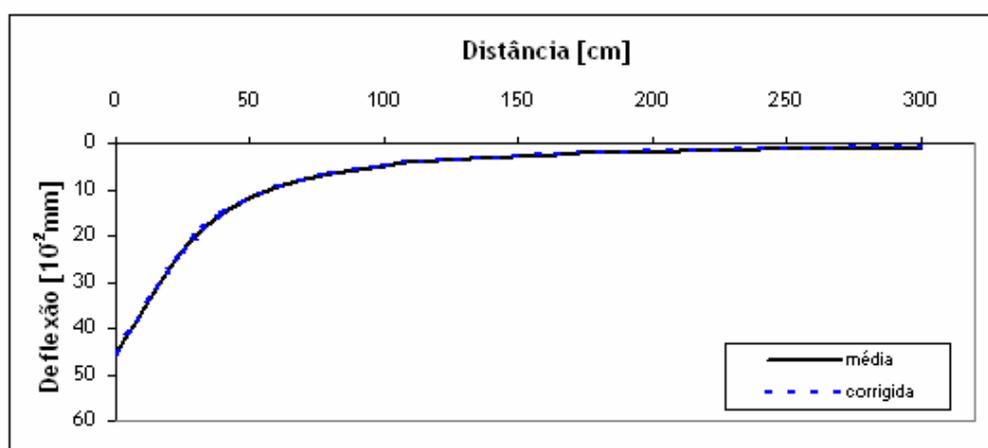
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	46	46	48	47
S2	54	58	58	57
S3	52	56	40	49
S4	56	56	58	57
S5	56	56	52	55
<b>deflexão média [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>53</b>
<b>deflexão média corrigida [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>54</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	16,0
S2	16,3
S3	15,8
S4	16,3
S5	14,8
<b>média</b>	<b>15,8</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	41	42	51	47	46	45	46	
25	21	19	26	27	23	23	24	
40	14	13	17	18	14	15	15	
60	9	8	11	11	9	9	10	
80	6	6	7	7	6	6	7	
100	4	5	5	5	4	5	5	
120	3	4	4	4	3	4	4	
180	2	2	2	2	2	2	2	
240	1	1	1	1	1	1	1	
300	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Raio de curvatura [m]</b>	157	141	126	160	134	142	139	



**SEÇÃO TESTE 1**

Data: 26/07/07

nº ciclos: 170.000

Temp. revest. [°C]: 16,2

**Área trincada [cm/m²]**

523

**Viga Benkelman**

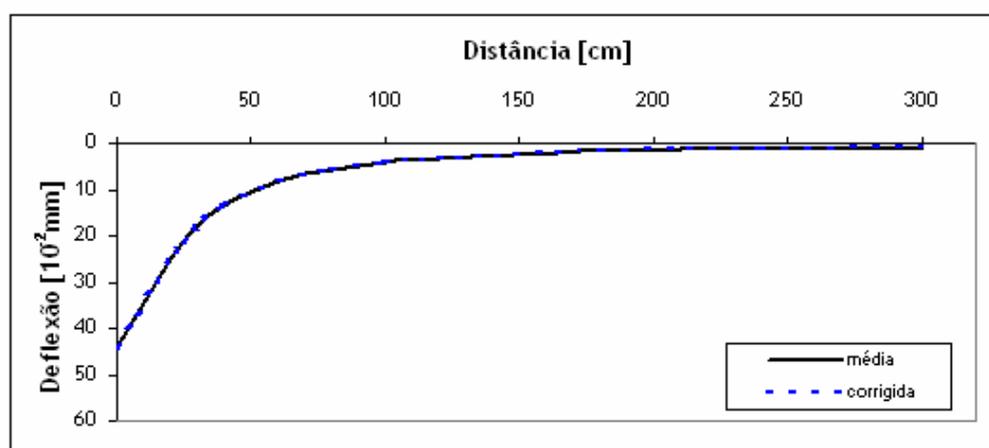
	deflexão [ $10^{-2}$ mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	46	46	46	46
S2	52	52	52	52
S3	54	54	40	49
S4	52	52	56	53
S5	46	46	52	48
<b>deflexão média [<math>10^{-2}</math> mm]</b>				<b>50</b>
<b>deflexão média corrigida [<math>10^{-2}</math> mm]</b>				<b>51</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	16,0
S2	16,5
S3	16,0
S4	17,0
S5	15,0
<b>média</b>	<b>16,1</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [ $10^{-2}$ mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	39	49	50	44	39	44	45	
25	17	25	26	20	19	21	22	
40	11	16	16	13	12	13	14	
60	7	10	9	8	7	8	8	
80	5	7	6	6	5	6	6	
100	4	5	4	4	3	4	4	
120	3	4	3	3	3	3	3	
180	2	2	2	2	1	2	2	
240	1	1	1	1	1	1	1	
300	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Raio de curvatura [m]</b>	145	129	130	129	156	137	133	



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 01/08/07  
 n° ciclos: 0  
 Temp. revest. [°C]: 19,3

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

0

**Viga Benkelman**

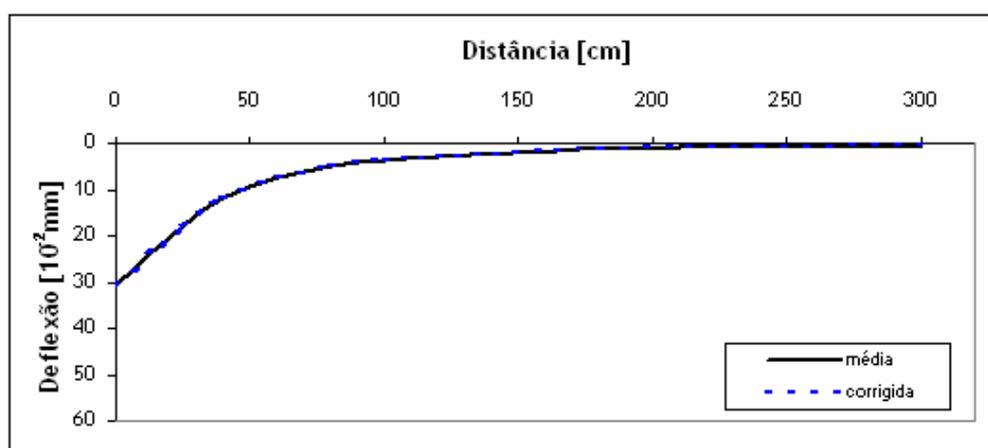
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	38	34	36	36
S2	32	32	32	32
S3	40	40	40	40
S4	36	34	36	35
S5	36	36	36	36
deflexão média [10 <sup>-2</sup> mm]				36
deflexão média corrigida [10 <sup>-2</sup> mm]				36

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	0,5
S2	0,5
S3	1,5
S4	1,5
S5	0,5
média	0,9

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	28	31	35	28	31	31	31	
25	16	20	21	15	19	18	18	
40	10	13	14	10	12	12	12	
60	7	8	9	6	7	7	8	
80	5	5	6	4	5	5	5	
100	3	4	5	3	3	4	4	
120	3	3	3	3	2	3	3	
180	1	1	2	1	1	1	1	
240	1	1	1	1	1	1	1	
300	1	1	1	1	0	1	1	
Raio de curvatura [m]	261	282	225	239	260	252	248	



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 09/08/07  
 n° ciclos: 50.000  
 Temp. revest. [°C]: 29,7

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

0

**Viga Benkelman**

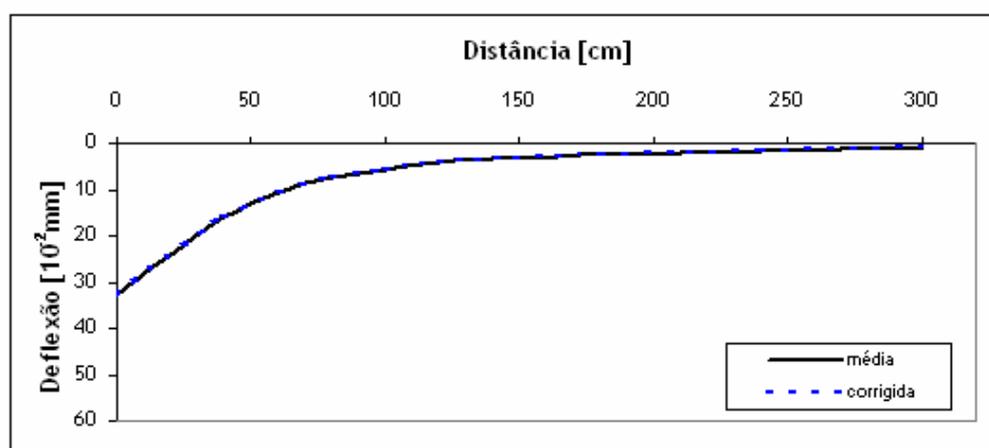
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	40	40	40	40
S2	34	42	42	39
S3	40	40	40	40
S4	38	36	36	37
S5	36	38	38	37
<b>deflexão média [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>39</b>
<b>deflexão média corrigida [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>38</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	2,5
S2	2,0
S3	1,5
S4	0,5
S5	0,5
<b>média</b>	<b>1,4</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	36	34	33	30	30	33	32	
25	23	24	23	21	20	22	22	
40	16	18	17	15	14	16	16	
60	11	12	11	10	9	11	10	
80	8	9	8	7	6	7	7	
100	6	7	6	5	4	6	5	
120	4	5	5	4	3	4	4	
180	2	3	3	2	2	2	2	
240	2	2	2	1	1	1	1	
300	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Raio de curvatura [m]</b>	<b>229</b>	<b>306</b>	<b>290</b>	<b>351</b>	<b>325</b>	<b>294</b>	<b>300</b>	



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 24/08/07

n° ciclos: 80.000

Temp. revest. [°C]: 17,4

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

76

**Viga Benkelman**

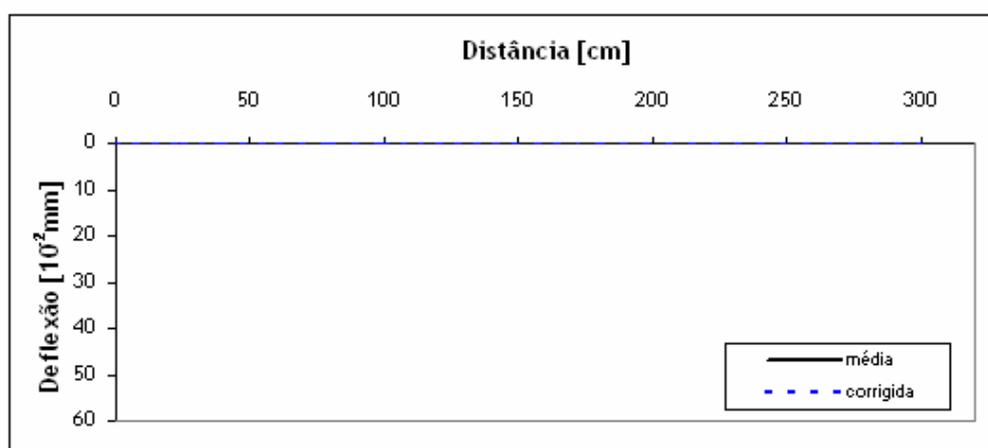
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	36	36	36	36
S2	34	36	34	35
S3	38	36	40	38
S4	40	38	37	38
S5	39	39	39	39
<b>deflexão média [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>37</b>
<b>deflexão média corrigida [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>38</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	3,0
S2	2,5
S3	3,0
S4	2,5
S5	0,5
<b>média</b>	<b>2,3</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0							#DIV/0!	#DIV/0!
25							#DIV/0!	#DIV/0!
40							#DIV/0!	#DIV/0!
60							#DIV/0!	#DIV/0!
80							#DIV/0!	#DIV/0!
100							#DIV/0!	#DIV/0!
120							#DIV/0!	#DIV/0!
180							#DIV/0!	#DIV/0!
240							#DIV/0!	#DIV/0!
300							#DIV/0!	#DIV/0!
<b>Raio de curvatura [m]</b>	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 03/09/07  
 nº ciclos: 125.000  
 Temp. revest. [°C]: 20,8

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

163

**Viga Benkelman**

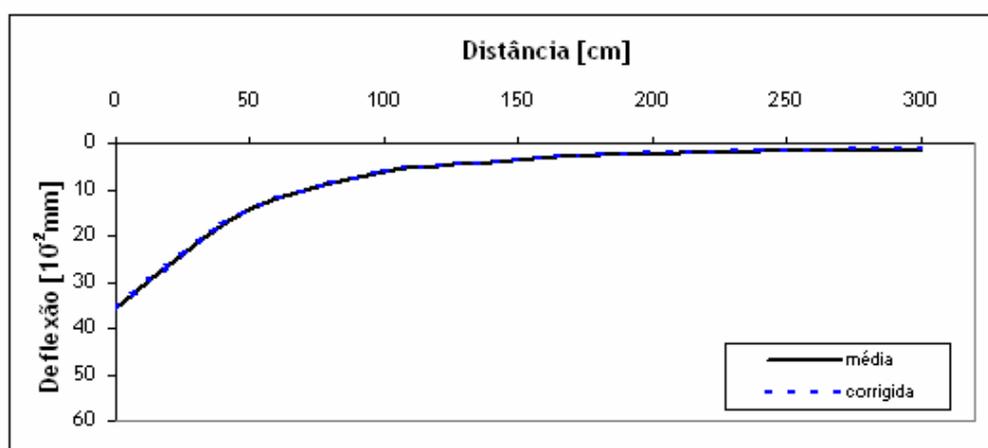
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1 <sup>a</sup> det.	2 <sup>a</sup> det.	3 <sup>a</sup> det.	média
S1	42	44	44	43
S2	44	44	44	44
S3	40	40	40	40
S4	36	36	36	36
S5	32	32	32	32
deflexão média [10 <sup>-2</sup> mm]				39
deflexão média corrigida [10 <sup>-2</sup> mm]				39

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	3,5
S2	3,0
S3	3,5
S4	2,5
S5	0,5
média	2,6

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	39	37	35	35	32	36	36	
25	25	25	23	24	23	24	24	
40	18	18	16	18	17	18	18	
60	12	12	11	12	12	12	12	
80	9	8	8	9	8	8	8	
100	7	6	6	6	6	6	6	
120	5	5	4	5	5	5	5	
180	3	3	2	3	3	3	3	
240	2	2	2	2	2	2	2	
300	1	1	1	1	1	1	1	
Raio de curvatura [m]	234	277	254	276	363	275	272	



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 19/09/07  
 nº ciclos: 187.000  
 Temp. revest. [°C]: 25,0

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

269

**Viga Benkelman**

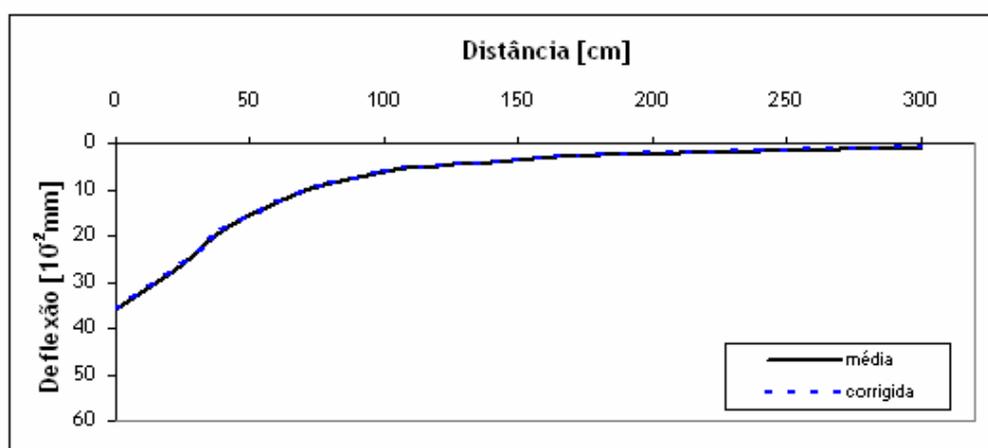
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1 <sup>a</sup> det.	2 <sup>a</sup> det.	3 <sup>a</sup> det.	média
S1	48	50	50	49
S2	46	44	46	45
S3	42	42	40	41
S4	40	40	40	40
S5	38	35	36	36
<b>deflexão média [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>42</b>
<b>deflexão média corrigida [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>42</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	4,5
S2	4,0
S3	4,0
S4	3,5
S5	0,5
<b>média</b>	<b>3,3</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	43	37	36	34	28	36	36	
25	30	28	25	26	20	26	26	
40	22	20	18	19	15	19	19	
60	15	13	12	13	10	12	12	
80	10	8	8	9	7	9	9	
100	7	6	6	7	5	6	6	
120	6	4	5	5	4	5	5	
180	3	2	2	3	2	2	2	
240	2	1	1	2	1	1	1	
300	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Raio de curvatura [m]</b>	<b>245</b>	<b>333</b>	<b>283</b>	<b>362</b>	<b>390</b>	<b>313</b>	<b>315</b>	



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 26/09/07

n° ciclos: 214.000

Temp. revest. [°C]: 21,1

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

339

**Viga Benkelman**

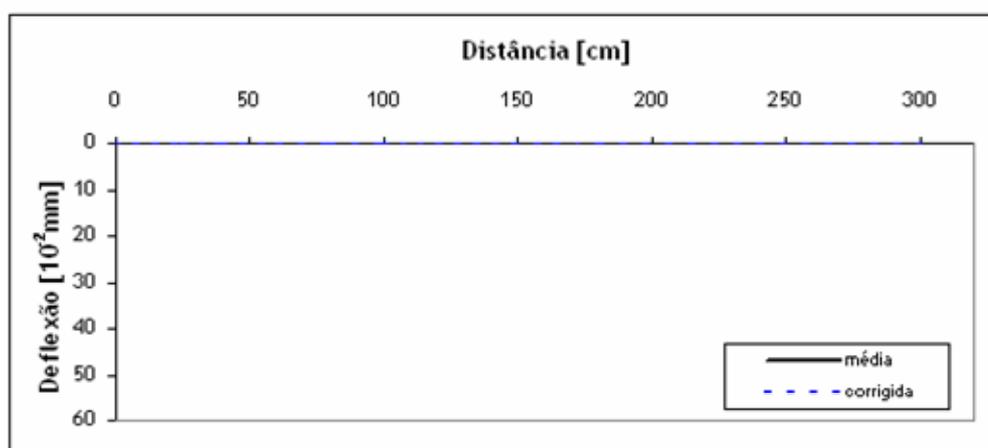
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1 <sup>a</sup> det.	2 <sup>a</sup> det.	3 <sup>a</sup> det.	média
S1	58	48	52	53
S2	44	54	44	47
S3	44	48	50	47
S4	42	46	44	44
S5	40	38	37	38
deflexão média [10 <sup>-2</sup> mm]				46
deflexão média corrigida [10 <sup>-2</sup> mm]				46

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR [mm]
S1	5,0
S2	5,0
S3	3,0
S4	3,5
S5	1,0
média	3,5

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]					média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5		
0						#DIV/0!	#DIV/0!
25						#DIV/0!	#DIV/0!
40						#DIV/0!	#DIV/0!
60						#DIV/0!	#DIV/0!
80						#DIV/0!	#DIV/0!
100						#DIV/0!	#DIV/0!
120						#DIV/0!	#DIV/0!
180						#DIV/0!	#DIV/0!
240						#DIV/0!	#DIV/0!
300						#DIV/0!	#DIV/0!
Raio de curvatura [m]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!



**SEÇÃO TESTE 2**

Data: 02/10/07  
 n° ciclos: 255.000  
 Temp. revest. [°C]: 19,0

**Área trincada [cm/m<sup>2</sup>]**

415

**Viga Benkelman**

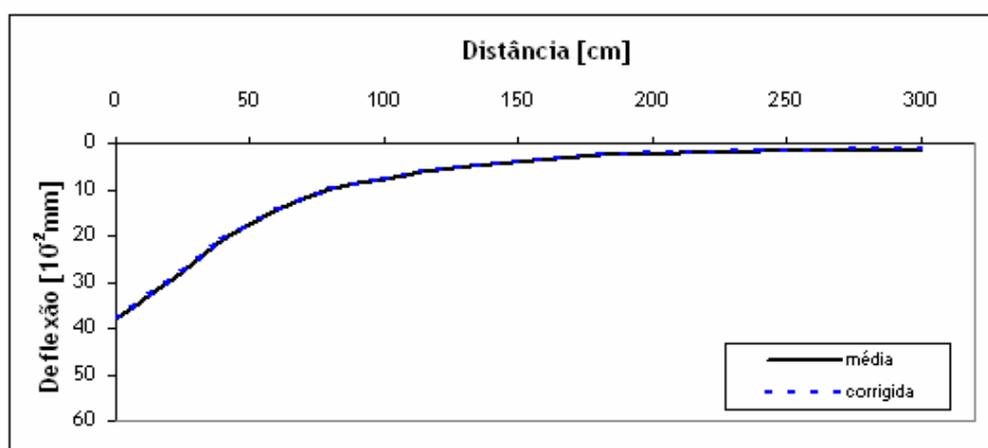
	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]			
	1ª det.	2ª det.	3ª det.	média
S1	58	48	52	53
S2	44	54	44	47
S3	44	48	50	47
S4	42	46	44	44
S5	40	38	37	38
<b>deflexão média [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>46</b>
<b>deflexão média corrigida [10<sup>-2</sup> mm]</b>				<b>47</b>

**Afundamento de trilha de roda**

	ATR
	[mm]
S1	5,5
S2	4,5
S3	4,0
S4	3,0
S5	1,0
<b>média</b>	<b>3,6</b>

**Deflectógrafo Digital**

Distância [cm]	deflexão [10 <sup>-2</sup> mm]						média	corrigida
	S1	S2	S3	S4	S5			
0	45	40	36	36	32	38	39	
25	31	32	24	25	27	28	28	
40	21	24	20	19	19	21	21	
60	14	16	15	14	12	14	14	
80	11	8	10	9	10	10	10	
100	8	9	6	9	7	8	8	
120	6	6	5	6	5	6	6	
180	3	2	2	3	2	2	2	
240	2	1	1	2	2	1	1	
300	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Raio de curvatura [m]</b>	<b>223</b>	<b>391</b>	<b>251</b>	<b>284</b>	<b>625</b>	<b>310</b>	<b>305</b>	



## **APÊNDICE B – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO**

Nº CP	condição	Peso Ar [g]	Peso lmeroso [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Densidade Aparente	D máx teórica	Volume de Vazios [%]	ensaio
1	C	995,07	558,12	436,95	2,28	2,48	7,99%	fadiga
2	C	903,42	507,16	396,26	2,28	2,48	7,88%	fadiga
3	C	1071,35	601,32	470,03	2,28	2,48	7,91%	fadiga
4	C	977,83	546,54	431,29	2,27	2,48	8,40%	fadiga
5	C	999,21	559,65	439,56	2,27	2,48	8,15%	fadiga
6	C	1112,3	623,12	489,18	2,27	2,48	8,13%	fadiga
7	C	1062,36	593,08	469,28	2,26	2,48	8,53%	fadiga
8	C	972,8	543,46	429,34	2,27	2,48	8,45%	fadiga
9	C	1048,19	586,89	461,3	2,27	2,48	8,19%	fadiga
10	C	1026,7	574,39	452,31	2,27	2,48	8,29%	fadiga
11	C	1005,83	562,59	443,24	2,27	2,48	8,31%	fadiga
12	C	1037,26	581,27	455,99	2,27	2,48	8,09%	fadiga
13	C	1013,74	568,11	445,63	2,27	2,48	8,09%	apenas RT (25°C)
14	C	1066,14	601,2	464,94	2,29	2,48	7,35%	MR (0,1 - 25°C) e RT
15	C	960,81	535,28	425,53	2,26	2,48	8,77%	MR (0,1 - 25°C) e RT
16	C	1045,68	588,93	456,75	2,29	2,48	7,50%	MR (0,1 - 25°C) e RT
17	C	995,45	555,51	439,94	2,26	2,48	8,58%	MR (0,2 - 25°C) e RT
18	C	1005,78	566,78	439	2,29	2,48	7,43%	MR (0,2 - 25°C) e RT
19	C	1078,47	599,73	478,74	2,25	2,48	8,98%	MR (0,2 - 25°C) e RT
20	C	863,13	483,45	379,68	2,27	2,48	8,15%	apenas RT (15°C)
21	C	1051,56	597,16	454,4	2,31	2,48	6,50%	MR (0,1 - 15°C) e RT
22	C	1039,38	589,4	449,98	2,31	2,48	6,67%	MR (0,1 - 15°C) e RT
23	C	1084,89	602,93	481,96	2,25	2,48	9,05%	MR (0,1 - 15°C) e RT
24	A	799,97	451,53	348,44	2,30	2,48	7,24%	apenas RT
25	A	914,14	516,11	398,03	2,30	2,48	7,21%	MR (0,1 - 25°C) e RT
26	A	824,48	468,27	356,21	2,31	2,48	6,48%	MR (0,1 - 25°C) e RT
27	A	853,43	481,18	372,25	2,29	2,48	7,37%	MR (0,1 - 25°C) e RT
28	A	939,94	528,63	411,31	2,29	2,48	7,67%	MR (0,2 - 25°C) e RT
29	A	893,59	504,05	389,54	2,29	2,48	7,31%	MR (0,2 - 25°C) e RT
30	A	860,06	486,79	373,27	2,30	2,48	6,90%	MR (0,2 - 25°C) e RT
31	A	873,5	492,99	380,51	2,30	2,48	7,25%	reserva
32	D	895,85	502,42	393,43	2,28	2,48	8,00%	apenas RT
33	D	846,85	475,14	371,71	2,28	2,48	7,95%	MR (0,1 - 25°C) e RT
34	D	872,98	490,78	382,2	2,28	2,48	7,71%	MR (0,1 - 25°C) e RT
35	D	842,95	472,34	370,61	2,27	2,48	8,10%	MR (0,1 - 25°C) e RT
36	D	813,83	456,62	357,21	2,28	2,48	7,95%	MR (0,2 - 25°C) e RT
37	D	902,38	505,81	396,57	2,28	2,48	8,06%	MR (0,2 - 25°C) e RT
38	D	845,11	472,32	372,79	2,27	2,48	8,40%	MR (0,2 - 25°C) e RT
39	D	885,78	496,73	389,05	2,28	2,48	8,01%	reserva
40	B	883,78	508,19	375,59	2,35	2,48	4,93%	apenas RT
41	B	897,25	516,2	381,05	2,35	2,48	4,86%	MR (0,1 - 25°C) e RT
42	B	1008,4	575,7	432,7	2,33	2,48	5,84%	MR (0,1 - 25°C) e RT
43	B	824,67	476,97	347,7	2,37	2,48	4,17%	MR (0,1 - 25°C) e RT
44	B	949,09	540,37	408,72	2,32	2,48	6,18%	MR (0,2 - 25°C) e RT
45	B	819,61	469,31	350,3	2,34	2,48	5,47%	MR (0,2 - 25°C) e RT
46	B	922,62	530,8	391,82	2,35	2,48	4,86%	MR (0,2 - 25°C) e RT
47	B	943,28	541,04	402,24	2,35	2,48	5,25%	reserva

**ENSAIO DE FADIGA**

RT [MPa] = 1,35

Temperatura de ensaio [°C] = 25

	Nº CP	h [cm]	d [cm]	% RT	TT [MPa]	Dif. T [MPa]	Carga [N]	Pressão	Nº Ciclos
<b>CONDIÇÃO C</b>	1	Rt							
	2	5,07	10,10	60%	0,81	3,24	6515	5,58	31
	3	6,02	10,10	50%	0,675	2,7	6447	5,52	92
	4	5,53	10,10	40%	0,54	2,16	4738	3,98	208
	5	5,66	10,10	35%	0,4725	1,89	4243	3,53	336
	6	6,35	10,10	30%	0,405	1,62	4080	3,39	558
	7	6,13	10,10	25%	0,3375	1,35	3282	2,67	809
	8	5,78	10,10	20%	0,27	1,08	2476	1,94	4471
	9	6,17	10,10	15%	0,2025	0,81	1982	1,50	20215
	10	5,97	10,10	13%	0,1755	0,702	1662	1,21	82080
	11	5,83	10,10	10%	0,135	0,54	1249	0,84	991547
	12	5,57	10,10	50%	0,675	2,7	5965	5,08	perdido

**ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

Pulso de carga: 0,1s

Frequência de ensaio: 1Hz

Temperatura de ensaio [°C]: 15,7

	Nº CP	d [cm]	h [cm]	MR <sub>1</sub> [Mpa]	MR <sub>2</sub> [Mpa]	MR <sub>3</sub> [Mpa]	MR [Mpa]	Leitura	RT [Mpa]
<b>CONDIÇÃO C</b>	20	10,18	4,90					716	1,83
	21	10,18	5,81	17.274	17.593	17.673	17.513	935	2,02
	22	10,18	5,74	13.924	13.890	13.773	13.862	1020	2,23
	23	10,18	6,23	13.988	14.808	14.121	14.306	980	1,98

corpos-de-prova que apresentaram os melhores resultados de Módulo de Resiliência quanto à resposta do equipamento (repetibilidade dos valores, forma da curva)

**ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

Pulso de carga: 0,1s

Frequência de ensaio: 1Hz

Temperatura de ensaio [°C]: 25

	Nº CP	d [cm]	h [cm]	MR <sub>1</sub> [Mpa]	MR <sub>2</sub> [Mpa]	MR <sub>3</sub> [Mpa]	MR [Mpa]	Leitura	RT [Mpa]
CONDICÃO C	13	10,08	4,90					500	1,29
	14	10,08	4,52	12.348	12.219	12.864	12.477	493	1,38
	15	10,08	5,54	13.414	13.829	13.748	13.664	555	1,27
	16	10,08	4,95	11.729	11.456	11.863	11.683	480	1,23
CONDICÃO A	24	10,08	5,13					538	1,33
	25	10,08	4,83	10.920	11.063	10.790	10.924	546	1,43
	26	10,08	4,94	11.479	11.285	12.067	11.610	570	1,46
	27	10,08	4,70	9.397	9.120	9.256	9.258	535	1,44
CONDICÃO D	32	10,08	4,69					360	0,97
	33	10,08	5,16	9.811	9.231	9.730	9.591	470	1,16
	34	10,08	4,60	8.897	8.977	9.155	9.010	427	1,18
	35	10,08	4,86	8.020	7.890	8.206	8.039	412	1,08
CONDICÃO B	40	10,08	5,69					661	1,47
	41	10,08	5,83	9.928	9.297	9.108	9.444	712	1,55
	42	10,08	5,51	8.021	8.312	8.237	8.190	522	1,20
	43	10,08	6,23	6.808	6.663	6.754	6.742	508	1,03

corpos-de-prova que apresentaram os melhores resultados de Módulo de Resiliência quanto à resposta do equipamento (repetibilidade dos valores, forma da curva)

**ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

Pulso de carga: 0,2s

Frequência de ensaio: 1Hz

Temperatura de ensaio [°C]: 25

	Nº CP	d [cm]	h [cm]	MR <sub>1</sub> [Mpa]	MR <sub>2</sub> [Mpa]	MR <sub>3</sub> [Mpa]	MR [Mpa]	Leitura	RT [Mpa]
CONDICÃO C	44	10,10	4,58	5.644	5.660	5.705	5.670	322	0,89
	45	10,10	5,11	8.109	8.098	8.155	8.121	466	1,15
	46	10,10	5,33	MR NÃO RELIZADO				538	1,28
CONDICÃO A	36	10,10	5,65	4.938	4.935	4.910	4.928	510	1,14
	37	10,10	5,12	8.500	8.590	5.819	7.636	579	1,43
	38	10,10	4,81	6.370	6.316	6.259	6.315	476	1,25
CONDICÃO D	28	10,10	5,40	7.817	8.124	7.681	7.874	480	1,12
	29	10,10	5,11	6.812	6.795	6.791	6.799	459	1,14
	30	10,10	4,92	6.783	6.791	6.920	6.831	427	1,10
CONDICÃO B	17	10,10	6,19	6.393	6.398	6.444	6.412	655	1,34
	18	10,10	5,79	6.255	6.214	6.172	6.214	553	1,21
	19	10,10	5,90	4.272	4.276	4.330	4.293	498	1,07

corpos-de-prova que apresentaram os melhores resultados de Módulo de Resiliência quanto à resposta do equipamento (repetibilidade dos valores, forma da curva)

**APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DO TRÁFEGO DA RODOVIA  
BR-290/RS**



## INFORMAÇÕES TRÁFEGO

	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11 - Esp	C12 - Esp	C13 - Esp	C14 - Esp	C15 - Esp	Total
2.004	540.130	32.750	7.607	39.019	1.210	12.521	26.665	9.385		3.479	20	261	2.202	0	675.249	
2.005	2.556.598	173.371	26.138	219.176	3.900	67.645	159.841	53.115	5.343	4.075	20.712	103	2.478	3.106	0	3.295.601
2.006	2.645.479	158.488	25.747	227.955	5.452	71.448	170.206	61.422	11.929	1	26.383	164	4.419	5	0	3.409.098
2.007	1.329.291	61.250	11.283	96.077	3.380	33.551	73.551	28.167	8.416	1	11.096	114	1.960	3	0	1.658.140
<b>total</b>	425.859	582.227	185.165	430.263	152.089	252	253	353								

2C

3C

2S2

2S3

3S3

TIPO DE EIXO	carga legal [t]	Fator equivalência	
		AASHTO	USACE
Simplex de Rodas Simples	6	0,33	0,28
Simplex de Rodas Duplas	10	2,39	3,29
Rodas Duplas em Tandem	17	1,84	8,55
Rodas Triplas em Tandem	25,5	1,56	9,30

FV (AASHTO)		
2004	2005	2006
3,06	3,08	3,10
<b>3,13</b>		

F faixa 0,70

F direção 1,00

DADOS NÃO OFICIAIS \*

TIPOS	AASHTO	USACE	2004		2005		2006		2007	
			Vol. Total	FV (AASHTO)						
2C	0,33+2,39	0,28+3,29	32.750	2,72	173.371	2,72	158.488	2,72	61.250	2,72
3C	0,33+1,64	0,28+8,55	39.019	1,97	219.176	1,97	227.955	1,97	96.077	1,97
2S2	0,33+2,39+1,64	0,28+3,29+8,55	12.521	4,36	67.645	4,36	71.448	4,36	33.551	4,36
2S3	0,33+2,39+1,56	0,28+3,29+9,30	26.665	4,28	159.841	4,28	170.206	4,28	73.551	4,28
3S3	0,33+1,64+1,56	0,28+8,55+9,30	9.385	3,53	53.115	3,53	61.422	3,53	28.167	3,53
			<b>FV médio</b>	<b>3,06</b>	<b>FV médio</b>	<b>3,08</b>	<b>FV médio</b>	<b>3,10</b>	<b>FV médio</b>	<b>3,13</b>

VOLUME TOTAL - TRÁFEGO TOTAL			VOLUME TOTAL - TRÁFEGO COMERCIAL			N - TRÁFEGO COMERCIAL - faixa mais solicitada		
	2004	2005	2006	2007	2004	2005	2006	2007
janeiro	591.194	554.840	518.224	60.807	66.569	65.733	1,31E+05	1,44E+05
fevereiro	474.821	540.047	501.864	62.037	63.061	58.584	1,34E+05	1,37E+05
março	258.211	220.395	229.076	61.427	60.594	63.556	1,32E+05	1,32E+05
abril	181.327	230.765	236.997	56.169	51.465	57.144	1,21E+05	1,12E+05
maio	182.774	160.460	171.979	54.812	57.001	60.752	1,18E+05	1,24E+05
junho	161.167	162.824	54.388	53.418	55.569	57.019	1,17E+05	1,16E+05
julho	214.016	203.543	57.082	59.441	1,23E+05	1,29E+05	1,20E+05	1,24E+05
agosto	171.346	172.383	54.800	58.947	1,18E+05	1,28E+05	1,23E+05	1,29E+05
setembro	175.716	201.088	57.430	63.885	1,24E+05	1,39E+05	1,18E+05	1,28E+05
outubro	193.163	229.105	60.280	59.669	1,28E+05	1,38E+05	1,24E+05	1,39E+05
novembro	239.554	258.516	66.022	65.357	1,29E+05	1,41E+05	1,28E+05	1,38E+05
dezembro	435.695	484.285	126.302	699.547	1,41E+05	1,51E+05	1,41E+05	1,42E+05
<b>675.249</b>	<b>3.295.601</b>	<b>3.409.098</b>	<b>1.658.140</b>	<b>720.490</b>	<b>2.70E+05</b>	<b>1,51E+06</b>	<b>1,56E+06</b>	<b>6,71E+05</b>
<b>TOTAL</b>	<b>9.038.088</b>	<b>1.852.108</b>	<b>4,01E+06</b>					

**APÊNDICE D – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DOS ENSAIOS  
ACELERADOS**



SEÇÃO TESTE 1



SEÇÃO TESTE 2

