

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

**PESAGEM EM MOVIMENTO DE CARGAS ATUANTES EM
RODOVIAS E SEU IMPACTO NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS
DA REDE TEMÁTICA DE ASFALTO**

André Luiz Bock

Porto Alegre
2016

ANDRÉ LUIZ BOCK

**PESAGEM EM MOVIMENTO DE CARGAS ATUANTES EM
RODOVIAS E SEU IMPACTO NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS
DA REDE TEMÁTICA DE ASFALTO**

Tese 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 Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
2016

ANDRÉ LUIZ BOCK

**PESAGEM EM MOVIMENTO DE CARGAS ATUANTES EM
RODOVIAS E SEU IMPACTO NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS
DA REDE TEMÁTICA DE ASFALTO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, 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, 21 de outubro de 2016

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE/UFRJ
Orientador

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

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profª Liedi L. B. Bernucci (EPUSP)
Drª. em Engenharia de Transportes pela EPUSP

Prof. Lélío A. T. Brito (PUC-RS)
PhD. em Engenharia Civil pela University of Nottingham

Profª Helena Beatriz Bettella Cybis (UFRGS)
Ph.D. em Engenharia de Transportes pela University Of Leeds

CIP - Catalogação na Publicação

Bock, André Luiz

Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da Rede Temática / André Luiz Bock. -- 2016. 265 f.

Orientador: Washington Peres Núñez.

Coorientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Pavimento. 2. Monitoramento de desempenho. 3. Fiscalização de cargas. 4. Sistemas de pesagem Weigh-in-Motion. 5. Rede temática de asfalto. I. Núñez, Washington Peres, orient. II. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, coorient. III. Título.

Dedico este trabalho à minha noiva, Susana,
aos meus pais Anildo e Ireci e ao meu irmão, Fábio;
pessoas de extrema importância que fizeram parte desta
caminhada, compartilhando amor, sonhos e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, pela proteção e pela oportunidade de realizar este sonho.

Gostaria de expressar aqui os meus agradecimentos a todos que participaram e contribuíram nesta caminhada, seja através de orientação técnica e científica, seja através de apoio, incentivo e confiança depositada.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Washington Peres Núñez e Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti pela confiança e oportunidade, pelo incentivo e principalmente pela qualidade de formação.

Ao CNPq e à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação às atividades necessárias para o desenvolvimento desta Tese. Agradeço também à ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres e a CONCEPA pela possibilidade de participação da Pesquisa de Pesagem em Movimento desenvolvida com Recursos de Desenvolvimento Tecnológico RDT.

À minha família, pelo incentivo, compreensão e confiança que sempre disponibilizaram, ajudando-me sempre a superar as dificuldades encontradas.

À minha noiva Susana pela compreensão, paciência e determinação para sempre superar as dificuldades impostas pela distância e pela saudade, e principalmente pelo imenso amor que sempre nos ajudou a superar a ausência física.

À toda equipe do Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LPAV), pesquisadores e funcionários, aos integrantes do programa PETER pelo apoio, disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios laboratoriais, monitoramentos de campo e principalmente pela amizade, companheirismo e vivência durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo convívio ao longo do curso, incentivo e amizade.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

BOCK, A. L. **Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da Rede Temática de Asfalto.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Nas últimas décadas os pavimentos rodoviários brasileiros têm tido seu desempenho comprometido devido a uma série de fatores, entre eles incluem-se não somente o crescente aumento do volume de tráfego de veículos pesados e aumento de sua capacidade de transporte, mas principalmente a circulação com cargas acima dos limites legais estabelecidos, configurando uma situação crítica para a sua adequada durabilidade da estrutura projetada. Paralelamente aos investimentos necessários, é importante também o desenvolvimento de métodos mais racionais de dimensionamento de pavimentos contemplando as especificidades dos materiais empregados e levando em consideração as condições climáticas e, principalmente uma completa e detalhada caracterização do tráfego solicitante. Neste contexto apresentado, a pesquisa insere-se em dois importantes estudos. O acompanhamento construtivo e monitoramento sistemático de desempenho de dois trechos na rodovia BR-448/RS e a continuidade do monitoramento de outros dois na BR-290/RS, trecho em concessão entre Osório e Porto Alegre (Freeway). Estas atividades inserem-se no “Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto Petrobras/ANP”, de abrangência nacional, para desenvolvimento de um novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos. O segundo estudo trata-se de um completo monitoramento de cargas na Freeway, através da instalação e operacionalização inédita de um equipamento de pesagem dinâmica de alta velocidade (High Speed Weigh-in-Motion – HS-WIM) para determinação do espectro de cargas e posterior análise de sua influência no desempenho de pavimentos. Com ambos os estudos foi possível, além de determinar o espectro de cargas, os carregamentos médios e os níveis de sobrecargas praticados naquela rodovia, verificar como estas cargas influenciam o desempenho do pavimento e confrontar estes dados com as tendências observadas através do monitoramento sistemático dos trechos analisados. Por meio do desenvolvimento do presente trabalho pretende-se contribuir para melhorias na engenharia rodoviária e de tráfego através da inserção de novas tecnologias de monitoramento e fiscalização das cargas transportadas e contribuir com o desenvolvimento de um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis proposto pela Rede Temática de Asfalto, através do levantamento de dados nos trechos experimentais para desenvolvimento de modelos de desempenho e sua posterior inserção nos modelos de calibração.

Palavras-chave: *Pavimento; Monitoramento de Desempenho; Fiscalização de cargas; Sistemas de Pesagem Weigh-in-Motion.*

ABSTRACT

BOCK, A. L. **Weigh in motion of road loads and their impact in pavement performance of the brazilian Asphalt Tematic Network.** 2016. Thesis (Doctor Degree in Civil Engineering) – Post-Graduation Program of Civil Engineering, Federal University os Rio Grande do Sul, UFRGS, Brazil, Porto Alegre.

In recent decades the Brazilian road pavements have had their performance reduced due to a number of factors, not only the increasing volume of heavy vehicles and increased transport capacity, but mainly the flow with loads above the established legal limits, setting a critical situation for the durability of the designed structure. Alongside the necessary investment, it is also important to the development of more rational methods of pavement design, considering the specificities of the materials used and taking into account the climatic conditions and a complete and detailed characterization of the traffic. In this context, the research was developed to attain two main objectives: the construction monitoring and systematic assessment of performance of two test sections built in BR-448/RS highway and the continuity of assesment of two others previously built in BR-290/RS, between Osório and Porto Alegre (known as Freeway). These activities are part of the "Integrated Project Theme Technology Network Petrobras Asphalt/ANP", a nationwide project aimed at developing a new Brazilian method for pavement design. The second objective was to conduct a comprehensive monitoring loads study on the Freeway, by installing and carrying on an unprecedented operation of a dynamic weighting equipment of high speed (High speed weigh-in-Motion - HS-WIM) to determine the loads spectrum and subsequent analysis of the influence on pavement performance. Both studies made possible to determine the loads spectrum, average loads and levels of overloads practiced on that highway, to estimate how these loads affect the pavement performance and to compare these data with the trends observed through the systematic assessment of the analyzed sections. This work aims to contribute to improvements in road and traffic engineering, by introducing new monitoring technologies, monitoring the transported cargo and contributing to the development of a new design method of flexible pavements, a major goal of the Thematic Network of Asphalt, to be achieved through experimental data collection in test sections, the development of performance models and their subsequent insertion in the calibration models.

Keywords: *Pavement; Performance Monitoring; Loads Control; Weigh-in-Motion Systems.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	20
1.2.1	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	20
1.3	ESTRUTURA DA TESE	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	SÍNTESE DA MATRIZ DE TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL	23
2.1.1	<i>DISTRIBUIÇÃO MODAL: PREDOMINÂNCIA DO MODAL RODOVIÁRIO</i>	24
2.1.2	<i>MODAL RODOVIÁRIO: CARACTERÍSTICAS, IMPORTÂNCIA E ESTADO DE CONSERVAÇÃO</i>	27
2.2	TRANSPORTE RODOVIÁRIO: FISCALIZAÇÃO DE CARGAS	32
2.2.1	<i>LEGISLAÇÃO NACIONAL PARA FISCALIZAÇÃO E CONTROLE DE CARGAS</i>	32
2.2.2	<i>SISTEMAS DE FISCALIZAÇÃO E CONTROLE DE CARGAS</i>	38
2.2.3	<i>ATUAL SITUAÇÃO DE FISCALIZAÇÃO DE CARGAS NO BRASIL</i>	43
2.2.4	<i>SÍNTESE: IMPORTÂNCIA DO TRÁFEGO NA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO</i>	48
2.3	SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO – WEIGH-IN-MOTION	56
2.3.1	<i>PRINCIPAIS SISTEMAS DISPONÍVEIS NO MERCADO</i>	61
2.3.2	<i>PRECISÃO DOS SISTEMAS E FATORES DE ERROS INTERNOS E EXTERNOS</i>	64
2.3.3	<i>CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO (ASTM E1318-02)</i>	66
2.3.4	<i>SISTEMAS WIM NO BRASIL E NO MUNDO – ESTADO DA PRÁTICA X ESTADO DA ARTE</i>	68
2.4	DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	73
2.4.1	<i>PRINCIPAIS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO</i>	76
2.4.2	<i>PRINCIPAIS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO</i>	79
2.4.3	<i>CONSERVAÇÃO E PROGRAMAS DE MONITORAMENTO</i>	86
2.4.4	<i>DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO</i>	91
2.4.5	<i>DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO</i>	101
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	111
3.1	APRESENTAÇÃO DOS TRECHOS MONITORADOS	113
3.1.1	<i>RODOVIA BR-290/RS – FREEWAY</i>	113
3.1.2	<i>BR 448/RS - RODOVIA DO PARQUE</i>	116
3.2	MONITORAMENTO PÓS-EXECUÇÃO DOS TRECHOS IMPLANTADOS	122
3.2.1	<i>AValiação de Irregularidade Longitudinal (IRI) – Perfilômetro Laser</i>	123
3.2.2	<i>DETERMINAÇÃO MACROTEXTURA SUPERFICIAL – ENSAIOS DE MANCHA DE AREIA (Hs)</i>	124

3.2.3	DETERMINAÇÃO MICROTEXTURA SUPERFICIAL - PÊNDULO BRITÂNICO (BPN)	125
3.2.4	AFUNDAMENTOS NAS TRILHAS DE RODA (ATR).....	126
3.2.5	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – DEFLEXÕES VIGA BENKELMAN E FWD.....	127
3.2.6	LEVANTAMENTO VISUAL DE DEFEITOS (LVC).....	129
3.3	MONITORAMENTO DE TRÁFEGO.....	132
3.3.1	<i>POSTO DE PESAGEM VEICULAR MÓVEL (PPVM)</i>	133
3.3.2	<i>ANÁLISE DE CARGAS ATRAVÉS HS-WIM (PESQUISA WIM)</i>	134
3.3.3	<i>DESENVOLVIMENTO DE BANCO DE DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS</i>	145
3.3.4	<i>ESTUDO COMPARATIVO DE CARGAS E TRÁFEGO MONITORADO (PPVM X WIM)</i>	147
3.4	IDENTIFICAÇÃO E SIMULAÇÃO DE DISTINTOS CENÁRIOS DE ESPECTROS DE CARGA.....	148
4	DEFINIÇÃO E ANÁLISE DO TRÁFEGO SOLICITANTE	160
4.1	BR-290/RS - DEFINIÇÃO DAS SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO NOS TRECHOS MONITORADOS	162
4.1.1	ESTIMATIVA DE NÚMERO N (DADOS DA PRAÇA DE PEDÁGIO KM 19PS).....	162
4.1.2	COMPARATIVO ENTRE OS SISTEMAS DE FISCALIZAÇÃO DE CARGAS - POSTO DE PESAGEM (PPVM) E SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO (WIM)	166
4.1.3	DEFINIÇÃO DO ESPECTRO DE CARGAS NA RODOVIA BR-290/RS ATRAVÉS DO MONITORAMENTO CONTINUADO DO SISTEMA DE PESAGEM EM MOVIMENTO (WIM)	177
4.2	DEFINIÇÃO DAS SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO NOS TRECHOS DA BR-448/RS.....	185
4.2.1	ESTIMATIVA DE NÚMERO N (DADOS VIDEOMONITORAMENTO)	186
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE ANÁLISE DE TRÁFEGO	187
5	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS MONITORADOS	190
5.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS TRECHOS MONITORADOS NA BR-290/RS -FREEWAY	190
5.1.1	<i>AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI) COM PERFILÔMETRO LASER</i>	191
5.1.2	<i>DETERMINAÇÃO DA MACROTEXTURA SUPERFICIAL – MANCHA DE AREIA (Hs)</i>	193
5.1.3	<i>DETERMINAÇÃO MICROTEXTURA SUPERFICIAL COM O PÊNDULO BRITÂNICO (BPN)</i>	196
5.1.4	<i>AFUNDAMENTOS NAS TRILHAS DE RODA (ATR)</i>	198
5.1.5	<i>AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – DEFLEXÕES VIGA BENKELMAN</i>	203
5.1.6	<i>LEVANTAMENTO VISUAL DE DEFEITOS (LV)</i>	205
5.2	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS TRECHOS MONITORADOS NA BR-448/RS	209
5.2.1	<i>AVALIAÇÃO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI) COM PERFILÔMETRO LASER</i>	210
5.2.2	<i>DETERMINAÇÃO MACROTEXTURA ATRAVÉS DO ENSAIO DE MANCHA DE AREIA (Hs)</i>	212
5.2.3	<i>DETERMINAÇÃO MICROTEXTURA SUPERFICIAL COM O PÊNDULO BRITÂNICO (BPN)</i>	216
5.2.4	<i>AFUNDAMENTOS NAS TRILHAS DE RODA (ATR)</i>	220
5.2.5	<i>AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – DEFLECTÔMETRO DE IMPACTO FWD</i>	223

5.2.6	<i>LEVANTAMENTO VISUAL DE DEFEITOS NOS TRECHOS MONITORADOS (LV)</i>	227
5.3	SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO DISTINTOS CENÁRIOS DE ESPECTROS DE CARGAS - TRÁFEGO IDEAL E REAL TRÁFEGO CIRCULANTE NA RODOVIA BR-290/RS	232
5.3.1	<i>MODELAGEM DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DOS CENÁRIOS DEFINIDOS</i>	232
5.3.2	<i>RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS</i>	233
5.3.3	<i>MODELAGEM DAS CURVAS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO</i>	235
	<i>CURVAS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL</i>	236
	<i>CURVAS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE</i>	238
	<i>CURVAS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE TRINCAMENTOS POR FADIGA</i>	242
5.3.4	<i>INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE CONFIABILIDADE</i>	243
5.3.5	<i>REDUÇÃO DA VIDA ÚTIL EM RELAÇÃO AOS CENÁRIOS DE CARGAS ANALISADOS</i>	245
5.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O ACOMPANHAMENTO DE DESEMPENHO	247
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	248
6.1	SISTEMAS DE FISCALIZAÇÃO DE CARGAS E DEFINIÇÃO DO TRÁFEGO SOLICITANTE	249
6.2	EVOLUÇÃO DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS MONITORADOS	252
6.3	IMPORTÂNCIA GERAL DOS FATORES ANALISADOS	255
6.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	257
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	258

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz de transporte brasileira (Adaptado de Medina, 2015)	25
Figura 2 – Projeções reestruturação da matriz de transportes (PNLT, 2012).....	26
Figura 3 – Investimentos do Ministério dos Transportes (% PIB) Fonte: PNL, 2012	28
Figura 4 – Investimentos em nível nacional PAC Rodoviário (BRASIL, 2012)	31
Figura 5 – Redução da vida útil de um pavimento em função do percentual de sobrecarga ...	36
Figura 6 - Sistemas de pesagem de veículos: grupos e subdivisões de metodologias.....	42
Figura 7 – Localização dos Postos de Pesagem de Veículos (Adaptado ANTT, 2016).....	47
Figura 8 – Crescimento da frota de caminhões entre os anos de 2003 e 2014.....	49
Figura 9 – Definição de solicitações de eixo padrão rodoviário para os cenários de cargas....	53
Figura 10 – Comparativo entre os cenários analisados:	53
Figura 11 – Comparativo entre os cenários analisados (cenário Ideal e cenário Real):	54
Figura 12 – Redução da vida útil em função dos percentuais de sobrecargas por eixo	55
Figura 13 – Comparativo entre sistemas de pesagem.....	58
Figura 14 – Seção típica de um pavimento flexível com efeitos gerados pelo tráfego	74
Figura 15 – Conceito de serventia (HAAS e HUDSON, 1978 adaptado por BALBO, 2007). 75	
Figura 16 – Interações entre os defeitos em rodovias pavimentadas (DNIT, 2006)	85
Figura 17 – Abrangência do projeto Rede Temática de Asfalto e níveis de análise	91
Figura 18- Formas dos modelos determinísticos.....	93
Figura 19 – Previsão de desempenho de pavimentos rodoviários.....	101
Figura 20 – Conceitos de projetos de pavimentos e seu estágio atual.....	104
Figura 21 – AASHTOWare – Software empregado para análise e previsão de desempenho	109
Figura 22 – Localização dos Trechos Experimentais UFRGS na BR-290/RS	114
Figura 23 – Representação do layout da pista no decorrer dos trechos experimentais	115
Figura 24 – Estrutura típica do pavimento dos trechos experimentais da BR 290/RS.....	115
Figura 25 – Principais etapas de execução dos trechos experimentais da BR-290/RS	116
Figura 26 – Mapa de situação da Rodovia do Parque, BR-448/RS.....	117
Figura 27 – Localização dos trechos monitorados da BR-448/RS - Rodovia do Parque.....	118
Figura 28 – Seção tipo do pavimento no decorrer dos trechos experimentais	118
Figura 29 – Seção tipo de pavimentação em tangente nos trechos experimentais	119
Figura 30 – Sequência de execução da estrutura do pavimento da BR-448/RS.....	120
Figura 31 – Esquematização das etapas de monitoramento	121
Figura 32 – Avaliação de irregularidade longitudinal com Perfilômetro Inercial Laser.....	123

Figura 33 – Ensaios para determinação de Macrotextura - Mancha de Areia.....	124
Figura 34 – Ensaios para determinação de Microtextura - Pêndulo Britânico.....	125
Figura 35 – Ensaio para verificação de Afundamento de Trilha de Roda (ATR).....	126
Figura 36 – Avaliação estrutural dos trechos monitorados através de Viga Benkelman	127
Figura 37 – Avaliação estrutural através de equipamento FWD.....	128
Figura 38 – Segregação da mistura asfáltica após aplicação.....	130
Figura 39 – Evolução de patologias após abertura ao tráfego.....	130
Figura 40 – Levantamento visual de diferentes mecanismos de degradação	130
Figura 41 – Esquematização do plano experimental da pesquisa	131
Figura 42 – Operação do PPVM do km 65 PS da BR-290/RS	133
Figura 43 – Localização, infraestrutura e operação do PPVM do km 65 PS da BR-290/RS.	134
Figura 44 – Esquematização do plano experimental da pesquisa	135
Figura 45 – Equipamento, sistema de aquisição de dados e informações técnicas.....	139
Figura 46 – Representação esquemática da instalação do equipamento HS-WIM.....	140
Figura 47 - Layout típico de instalação de sensores WIM	142
Figura 48 - Sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores	142
Figura 49 – Resumo das etapas de instalação do sistema WIM na BR-290/RS	143
Figura 50 – Aproximação simultânea dos dois veículos de teste (2S3 e 3C)	144
Figura 51 – Local de instalação do sistema de pesagem em movimento.....	145
Figura 52 - Tela do software online de acesso remoto ao sistema de pesagem WIM	146
Figura 53 – Localização dos postos de controle e coleta de dados de pesagem.....	148
Figura 54 – Equivalências de classes e agrupamentos de eixos.....	150
Figura 55 – Tabela de Classificação FHWA.....	150
Figura 56 – Estrutura do banco de dados gerado para análise do tráfego	152
Figura 57 – Estrutura do banco de dados gerado para análise do tráfego	153
Figura 58 – Tela do software AASHTOWare Pavement ME Design.....	156
Figura 59 – Definição das condições de tráfego conforme análise realizada anteriormente .	157
Figura 60 – Dados de entrada de tráfego no AASHTOWare (Brito & Specht, 2013).....	158
Figura 61 – Exemplo de definição das condições de carregamento.....	158
Figura 62 – Representação esquemática da análise de dados realizada	159
Figura 63 – VMD: Volume Médio Diário de veículos na pista sul (km19).....	162
Figura 64 – VMDc: Volume Médio Diário de Veículos Comerciais na pista sul (km19).....	163
Figura 65 – Volume total de veículos e volume de veículos comerciais monitorados	166
Figura 66 – Volume de veículos comerciais monitorados mensalmente.....	167

Figura 67 – Dados comparativos e percentuais de VMDC obtido através do monitoramento	167
Figura 68 – Números de pesagens realizadas pelo PPVM km 65 PS da BR 290/RS	169
Figura 69 – Comparativo de percentuais de veículos por classe para os dois sistemas	173
Figura 70 – Dados comparativos da frota analisada através de diferentes bancos de dados..	174
Figura 71 – Particionamento das tabelas de dados:.....	177
Figura 72 – Distribuição dos percentuais de eixos ESRS e ESRD nas faixas de carga	179
Figura 73 – Distribuição dos percentuais de eixos ETD e ETT nas faixas de cargas:	179
Figura 74 – Percentuais médios de eixos com sobrecarga na frota analisada	179
Figura 75 – Distribuição de cargas em função dos grupos de eixos.....	184
Figura 76 – Evolução da irregularidade longitudinal dos trechos monitorados 1 e 2	191
Figura 77 – Comparativo da evolução de irregularidade longitudinal	192
Figura 78 – Ajuste linear para evolução da irregularidade longitudinal	193
Figura 79 – Evolução da macrotextura superficial dos trechos monitorados 1 e 2	194
Figura 80 – Comparativo entre a evolução da macrotextura dos trechos monitorados.....	195
Figura 81 – Ajuste exponencial para evolução da macrotextura superficial.....	196
Figura 82 – Evolução da microtextura nos trechos monitorados 1 e 2.....	197
Figura 83 – Comparação entre a evolução da macrotextura nos trechos monitorados	197
Figura 84 – Ajuste exponencial para evolução da microtextura superficial.....	198
Figura 85 – Resultados de evolução de ATR na trilha interna, trilha externa.....	199
Figura 86 – Resultados de evolução de ATR na trilha interna, trilha externa.....	199
Figura 87 – Resultados de evolução de ATR, valores máximos (trilha externa)	199
Figura 88 – Ajuste linear para evolução de deformações permanentes (ATR).....	201
Figura 89 – Comparativo da evolução de deformação permanente dos trechos	202
Figura 90 – Comparativo da evolução de deformação permanente dos trecho.....	202
Figura 91 – Evolução das deflexões características corrigidas em função da temperatura....	203
Figura 92 – Ajuste exponencial para evolução das deflexões nos trechos monitorados.....	204
Figura 93 – Evolução dos defeitos superficiais durante o período de monitoramento.....	205
Figura 94 – Remendo superficial executado no trecho monitorado 1 da BR-290/RS).....	206
Figura 95 – Surgimento das primeiras trincas de fadiga no trecho monitorado 1	207
Figura 96 – Aspecto da superfície de rolamento	208
Figura 97 – Rodovia BR-448/RS, aspectos gerais e datas de levantamentos realizados	209
Figura 98 – Evolução da irregularidade longitudinal dos trechos monitorados 1 e 2	210
Figura 99 – Comparativo entre a evolução de irregularidade longitudinal nos trechos	211
Figura 100 – Ajuste linear para evolução da irregularidade longitudinal	212

Figura 101 – Evolução da macrotextura superficial dos trechos monitorados 1 e 2.....	213
Figura 102 – Resultados de macrotextura ao longo dos trechos 1 e 2.....	214
Figura 103 – Desgaste superficial dos agregados 1.....	214
Figura 104 – Segregação da mistura asfáltica (BR-448/RS trecho 1 e trecho 2).....	215
Figura 105 – Ajuste exponencial para evolução da macrotextura superficial.....	215
Figura 106 – Comparativo da evolução de macrotextura superficial.....	216
Figura 107 – Evolução da microtextura superficial nos trechos monitorados da BR-448.....	217
Figura 108 – Resultados comparativos de microtextura.....	218
Figura 109 – Comparativo da evolução de microtextura superficial.....	219
Figura 110 – Ajuste exponencial para evolução da microtextura superficial.....	219
Figura 111 – Evolução de ATR na trilha interna, trilha externa e valores médios.....	220
Figura 112 – Evolução de ATR, com valores máximos.....	221
Figura 113 – Ajuste linear para evolução de deformações permanentes (ATR).....	222
Figura 114 – Comparativo da evolução de deformação permanente.....	222
Figura 115 – Deflexão máxima D_0 do Trecho 1 e bacias de deflexão.....	223
Figura 116 – Deflexão máxima D_0 do Trecho 2 e bacias de deflexão.....	223
Figura 117 – Valores médios para bacias de deflexão nas trilhas de roda.....	224
Figura 118 – Evolução das deflexões corrigidas em função da temperatura.....	225
Figura 119 – Análises de deflexões e bacia de deflexão no Trecho 1.....	226
Figura 120 – Levantamento do perfil transversal com o equipamento AMAC.....	228
Figura 121 – Altura da lâmina de água nas trilhas de roda Trecho 1 e Trecho 2 BR-448.....	229
Figura 122 – Ilustração do equipamento AMAC e do funcionamento dos sensores laser.....	230
Figura 123 – Tela do AASHTOWare (empregado para análise e previsão de desempenho).....	233
Figura 124 – Tela do software AASHTOWare Pavement ME Design.....	234
Figura 125: Estrutura do pavimento da BR-290/RS.....	235
Figura 126 – AASHTOWare Pavement ME Design: Resultados das análises.....	236
Figura 127 – Comparativo entre previsões de desempenho.....	237
Figura 128 – Irregularidade longitudinal para os distintos cenários.....	238
Figura 129 – Exemplo de previsão da evolução de deformação permanente.....	239
Figura 130 – Comparativo entre previsões de evolução de deformação permanente.....	239
Figura 131 – Detalhe do comparativo entre previsões de evolução de deformação.....	240
Figura 132 – Deformação permanente na camada asfáltica para os distintos cenários.....	241
Figura 133 – Deformação permanente total para os distintos cenários.....	241
Figura 134 – Comparativo entre previsões de desempenho considerando distintos cenários.....	242

Figura 135 – Trincamento por fadiga para os distintos cenários de espectro de cargas.....	243
Figura 136 – Influência do nível de confiabilidade das análises realizadas	244
Figura 137 – Vida útil do pavimento quanto aos parâmetros analisados	245
Figura 138 – Redução percentual da vida útil do pavimento	246

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas máximas legais segundo regulamentação CONTRAN	34
Tabela 2 – Análise de cargas BR-290/RS: NÚÑEZ et al.,2010	37
Tabela 3 – Distribuição dos postos fixos e móveis de pesagens (DNIT, 2006)	45
Tabela 4 – Categorias de Sistemas de pesagem em movimento (ASTM E1318-02).....	67
Tabela 5 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)	67
Tabela 6 – Valores típicos de acurácia (intervalo de confiança $\pm 1\sigma$).....	68
Tabela 7 – Categorias de defeitos nos pavimentos.....	80
Tabela 8 – Resumo principais tipos de trincamento (adaptado DNIT, 2006)	82
Tabela 9 – Resumo das causas e tipos de deformações permanentes (adaptado DNIT, 2006)	83
Tabela 10 – Impacto dos defeitos superficiais no desempenho do pavimento (SILVA, 2008)	86
Tabela 11 - Tipos de modelos de desempenho (FHWA, 2006).	95
Tabela 12 - Expectativa dos parâmetros de correlação (FHWA, 2006)	97
Tabela 13 - Principais modelos de previsão de desempenho desenvolvidos no Brasil	99
Tabela 14 – Atuais etapas de monitoramento dos trechos LAPAV/UFRGS	113
Tabela 15 – Tráfego considerado para projeto do pavimento e análises mecánísticas	119
Tabela 16 – Periodicidade das avaliações pós-execução dos trechos monitorados	122
Tabela 17 – Categorias de Sistemas de pesagem em movimento (ASTM E1318-02).....	138
Tabela 18 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)	139
Tabela 19 – Valores típicos de acurácia (intervalo de confiança $\pm 1\sigma$).....	139
Tabela 20 – Veículos de teste e parâmetros para calibração do sistema	144
Tabela 21 - Resumo das faixas de carregamentos verificados	151
Tabela 22 – Planilha de fluxo diário classificado (pedágio P1 Freeway - Concepa)	164
Tabela 23 – Estimativa dos fatores de veículo (FV) e dos fatores de carga (FC)	165
Tabela 24 – Comparativo entre períodos de aquisição de dados PPVM e WIM	170
Tabela 25 – Comparativo entre distribuição percentual entre classes (PPVM e WIM).....	172
Tabela 26 – Síntese do registro de excesso de cargas PPVM km65 PS – BR-290	175
Tabela 27 – Síntese do registro de excesso de cargas WIM km72 PS – BR-290	175
Tabela 28 – Distribuição quantitativa de eixos dentro das faixas de cargas	178
Tabela 29 – Distribuição percentual entre classes para o período de análise (2014)	180
Tabela 30 – Distribuição percentual entre classes para o período de análise (2014)	181
Tabela 31 – Classes de veículos contabilizados no estudo de tráfego (BR-448/RS)	186
Tabela 32 – Estimativa do número N da Rodovia BR-448/RS o	187

Tabela 33 – Incidência de defeitos nos trechos da BR-290 em função do Tráfego	208
Tabela 34 - Dados de perfis transversais dos trechos monitorados na BR-448/RS	228
Tabela 35 - Resultados de IGG dos trechos monitorados na BR-448/RS	230
Tabela 36 – Defeitos superficiais observados no Trecho 1 e Trecho 2.....	231
Tabela 37 - Cenários de cargas analisados	233

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ALF: *Axle Load Factors*
ANP: Agência Nacional do Petróleo
ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM: *American Society for Testing and Materials*,
ATR: Afundamento nas Trilhas de Roda
BPN: *British Pendulum Number*
CA: Concreto Asfáltico
CBR&C: Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões
CBR: *Califórnia Bearing Ratio*
CGU: Controladoria-Geral da União
CMT: Capacidade Máxima de Tração
CNT: Confederação Nacional dos Transportes
CONCEPA: Concessionária da Rodovia Porto Alegre Osório
CONTRAN: Conselho Nacional de Trânsito
COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
DENATRAN: Departamento Nacional de Trânsito
DNER: Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DQL: *Data Query Language*
ESAL: *Equivalent Standard Axle Load*
ESRD: Eixo Simples de Rodas Duplas
ESRS: Eixo Simples de Rodas Simples
ETD: Eixo Tandem Duplo
ETT: Eixo Tandem Triplo
FHWA: *Federal Highway Administration*
FWD: *Falling Weight Deflectometer*
HDM: *Highway Design and Maintenance*
HS- WIM: *Hight Speed Weigh-in-Motion*
IGG: Índice de Gravidade Global
INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia
IRI: *International Roughness Index*

LAPAV: Laboratório de Pavimentação da UFRGS
LASTRAN: Laboratório de Sistemas de Transportes da UFRGS
LS-WIM: *Low Speed Weigh-in-Motion*
LTPP: *Long Term Pavement Performance*
M-EPDG: *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*
MS-WIM *Multi-Sensors Weigh-in-Motion*
NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*
PAC: Programa de Aceleração do Crescimento
PBT: Peso Bruto Total
PBTC: Peso Bruto Total Combinado
PIAF: Posto Integrado Automatizado de Fiscalização
PIB: Produto Interno Bruto
PNLT: Plano Nacional de Logística e Transporte
PPV: Postos de Pesagem Veicular
PRF: Polícia Rodoviária Federal
QI: Quarter-car Index
RDT: Recursos de Desenvolvimento Tecnológico
SAMDM: *South African Mechanistic Design Method*
SDIMPA: Sistema de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos
SGP: Sistema de Gerência de Pavimentos
SHRP: *Strategic Highway Research Program*
SQL: *Structured Query Language*
SRTA: Sistema da Rede Temática de Asfaltos
STRS: *Strategic Transportation Research Study*
TER: Trilha de Roda Externa
TRB: *Transportation Research Board*
TRI: Trilha de Roda Interna
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina
USACE: *US Army Corps of Engineers*
VMD: Volume Médio Diário
VRD: valor de resistência a derrapagem
WIM: *Weigh-in-Motion*

1 INTRODUÇÃO

Uma adequada infraestrutura de transportes é fundamental para a mobilidade de cargas e passageiros, representando uma importante contribuição no desenvolvimento econômico e, conseqüentemente, no desenvolvimento social e cultural de qualquer sociedade. A disponibilidade de uma boa infraestrutura é elemento primordial no desenvolvimento de uma nação, e mais ainda no caso do Brasil, um país de dimensões continentais, onde a infraestrutura de transportes tem mais acentuada sua importância, devido à sua função de transferir insumos e bens finais para as mais diversas regiões do país com distâncias de transporte consideráveis.

Ao analisar o sistema de transportes brasileiro observa-se uma distorção da matriz de transportes quanto à utilização dos modais que a integram, principalmente pela utilização do modal rodoviário em detrimento dos demais modais no que diz respeito à movimentação de cargas. A matriz rodoviária representa um papel de destaque tanto no transporte de passageiros quanto no transporte de cargas, sendo responsável por mais de 60% de toda movimentação de mercadorias no território nacional, apesar da enorme extensão costeira e dos rios navegáveis.

Apesar de o modal rodoviário ser responsável pela grande maioria de transporte de cargas e passageiros, o setor apresenta carências históricas em termos de infraestrutura, sua situação é preocupante, tanto em quantidade quanto em qualidade da malha pavimentada, necessitando de medidas constantes de manutenção e melhorias.

Nas últimas décadas os pavimentos rodoviários brasileiros têm tido seu desempenho comprometido devido a uma série de fatores, entre eles incluem-se não somente o crescente aumento do volume de tráfego de veículos pesados e aumento de sua capacidade de transporte, mas principalmente a circulação com cargas acima dos limites legais estabelecidos, configurando uma situação crítica para a sua adequada durabilidade da estrutura projetada.

Além disso, deficiências na fiscalização das cargas transportadas somadas à falta de programas de manutenção adequados fazem com que os pavimentos tenham suas vidas úteis expressivamente reduzidas através da manifestação prematura dos mecanismos de degradação levando a um panorama preocupante em relação a seu estado atual de conservação.

Segundo a Pesquisa CNT de Rodovias realizada no ano de 2015, da extensão rodoviária avaliada (100.673km), com 80.959 km (80,3%) de rodovias sob gestão pública e 19.804 km (19,7%) de rodovias concedidas, somente 34,1% da extensão pública foram classificados como boa ou ótima, sendo a grande maioria classificada de regular a péssimo (65,9%).

No que se refere ao estado do pavimento 44,6% são classificados como ótimo ou bom, valores bem inferiores aos observados nas rodovias sob concessão (79,5%) o que demonstra a importância da participação do ente privado no que se refere à melhoria da qualidade das rodovias brasileiras e a necessidade de maior esforço do governo para promover ações de melhoria da infraestrutura de transporte (CNT, 2015).

As rodovias devem ser entendidas prioritariamente como patrimônio de um país. E, como para todo patrimônio, é necessário que haja um planejamento que considere sua manutenção e, neste caso específico, também sua expansão, já que a demanda por este tipo de infraestrutura de transportes é sempre crescente.

Em função do importante papel desempenhado pela malha rodoviária brasileira, principalmente no que diz respeito ao transporte de cargas, há uma constante necessidade de crescimento, manutenção e melhorias. Para recuperar o crescimento reduzido nas décadas de 1980 e 1990, os investimentos em manutenção de rodovias em degradação, duplicação de rodovias com grande fluxo de tráfego e construção de novas rodovias vêm aumentando gradativamente.

Desta forma, os dimensionamentos de pavimentos ganham papel cada vez mais importante no cenário nacional, enfrentando um novo desafio, visto que o tráfego comercial que solicita os pavimentos tem crescido de forma exponencial, e considerar estes parâmetros se torna indispensável para garantir um bom desempenho da estrutura projetada.

O crescente aumento do fluxo de veículos pesados associado às demandas dos transportadores de carga que se mantém em uma busca incessante por encontrar maneiras de reduzir o custo de transporte, acaba por levar a um inevitável aumento das cargas dos caminhões transportadores.

Há uma necessidade de adequação das rodovias à necessidade de atual de transporte. Restringir as cargas, apesar de necessário, deve ser feito de forma eficaz tanto para o proprietário da infraestrutura – os governos nas diferentes esferas/as concessionárias –, quanto para o usuário – o transportador. Parece evidente a necessidade então de se elevar as cargas para as quais os pavimentos são projetados; no entanto, para isto é necessário que os manuais de projeto se adequem e considerem a cargas atuais; o que ainda não é uma realidade (Brito & Specht, 2015).

A previsão do desempenho dos pavimentos, atividade de fundamental importância para sua manutenção e restauração, pressupõe o acurado conhecimento da composição de veículos e das cargas que solicitarão essas estruturas ao longo do período de projeto, quantificando desta forma a magnitude do impacto das reais cargas solicitantes nos parâmetros de desempenho funcionais e estruturais do pavimento.

Neste contexto apresentado, a presente tese relata o desenvolvimento de uma pesquisa, com duas grandes linhas de atuação. A primeira, de abrangência nacional, denominado de “Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto Petrobras/ANP”, consiste no acompanhamento sistemático de trechos monitorados construídos nas mais diversas regiões do Brasil, com a finalidade de formação de um significativo banco de dados nacional de caracterização de materiais e desempenho de diferentes estruturas de pavimentos asfálticos, nas mais distintas condições climáticas e de solicitação de tráfego. Estes dados de monitoramento servirão para calibração de modelos nacionais de desempenho e para implantação de um novo método de dimensionamento.

A segunda grande linha consiste na tentativa de solução para uma das principais dificuldades encontradas no cenário nacional quando se trata de dimensionamento de pavimentos novos, planos de manutenção e reabilitação de rodovias em operação, ou seja, o conhecimento das reais cargas que solicitam a estrutura do pavimento durante a sua vida de serviço. Neste sentido, a Pesquisa WIM relatada nesta Tese procurou realizar um monitoramento acurado (e contínuo) das reais cargas circulantes em uma importante rodovia do sul do país, a BR-290/RS – Freeway, através da instalação e operacionalização de um equipamento de pesagem dinâmica de alta velocidade (*High Speed Weigh-in-Motion – HS-WIM*).

A referida pesquisa foi desenvolvida em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul através do Laboratório de Pavimentação (LPAV), empresas do setor privado e a Concessionária da Rodovia Porto Alegre Osório (CONCEPA) com financiamento da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) através de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT).

Objetiva-se contribuir para melhorias na engenharia rodoviária e de tráfego através da inserção de novas tecnologias de monitoramento e fiscalização das cargas transportadas e contribuir com o desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis proposto pela Rede Temática de Asfalto.

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A atual situação do transporte rodoviário de cargas e as condições de conservação da malha rodoviária nacional foram os principais motivadores para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Observa-se em um contexto nacional que os pavimentos rodoviários, principalmente os asfálticos (objeto de estudo da presente pesquisa), têm cada vez mais seu desempenho comprometido, com uma expressiva redução de vida útil.

O desempenho de um pavimento depende de uma complexa combinação de fatores, quais sejam os materiais utilizados, técnicas construtivas, ação climática, tráfego, ações de manutenção e restauração. O pavimento é projetado para uma determinada combinação destes fatores e cada um deles tem relevante importância no seu desempenho ao longo do período de projeto.

Além da qualidade dos materiais empregados, das considerações de projeto, das técnicas construtivas e do clima, os pavimentos rodoviários brasileiros têm seu desempenho comprometido em grande parte pela agressividade do tráfego. Sobrecargas e deficiência (inexistência) de fiscalização são os principais agravantes que levam a uma intensificação dos mecanismos de degradação. Estima-se que há uma significativa parcela dos problemas precoces nos pavimentos advindos desta questão.

A intensa utilização do modal rodoviário para o transporte de cargas em detrimento dos demais modais de transporte, com mais de 60% das cargas transportadas no território nacional realizadas através das rodovias, acarreta em um aumento expressivo da frota de veículos comerciais nas rodovias, o que acaba comprometendo não somente o desempenho dos pavimentos, mas também prejudicando a mobilidade dos veículos leves.

O crescimento continuado do comércio, e do congestionamento de tráfego, torna difícil para a indústria realizar economicamente suas trocas físicas, sem usar cargas cada vez maiores e mais pesadas. Afim de manter a competitividade do modal rodoviário, frente às crescentes demandas de transporte, o aumento das cargas transportadas (acima dos limites legais) é prática comum entre os transportadores.

No que se refere aos pavimentos, a sobrecarga é extremamente danosa, diminuindo expressivamente sua vida útil. No Brasil, que apresenta em sua matriz de transportes uma predominância histórica de transporte de cargas através do modal rodoviário, este cenário tem

provocado um aumento na degradação dos pavimentos, uma degradação prematura que vem se agravando nas últimas décadas. Neste contexto alguns fatores merecem especial atenção e são debatidos nesta tese; destacam-se: a circulação com excesso de cargas, a ampliação de limites de “tolerância” nas cargas por eixo, as deficiências na fiscalização de cargas e a necessidade de atualização dos métodos de dimensionamento.

Existem sérias dificuldades quanto à fiscalização das cargas que trafegam pelas rodovias brasileiras. Dados e informações dos excessos de carga praticados ainda são muito escassos. Além da quantidade insuficiente de postos de pesagem, problemas quanto à infraestrutura e horários de funcionamento, verifica-se ainda uma carência de investimento em equipamentos para a coleta de dados ao longo das rodovias, mesmo que para efeitos únicos de pesquisa e não de fiscalização/punição, ou seja, fora dos postos de pesagem obrigatórios.

Em função das dificuldades relatadas, que impedem uma fiscalização efetiva, o desconhecimento das cargas excedentes afeta não somente o cumprimento da lei como também a precisão dos fatores de carga dos veículos e, conseqüentemente, a equivalência de carga por eixo padrão, conceito ainda empregado no dimensionamento de pavimentos.

Em se tratando de tolerâncias de cargas transportadas e tráfego com excesso de cargas, ao contrário do que é anunciado e defendido por algumas classes, o aumento da tolerância por eixo afeta sim a vida útil dos pavimentos, e de forma muito significativa. Recentemente, contrariando as expectativas do meio técnico e acadêmico, foi aprovada a nova Resolução do CONTRAN, nº 489/2014, ampliando o limite de tolerância nos eixos dos caminhões de 7,5% para 10%. Este aumento da tolerância é fruto de reivindicações dos transportadores e já vinha sendo debatida há alguns anos.

Segundo estimativa de Pinto e Preussler (2002) há uma redução de mais da metade da vida útil de um pavimento para uma sobrecarga de 10%. Considerando uma sobrecarga “legal” de 7,5% haveria uma redução na vida esperada em um pavimento projetado para durar dez anos, para menos de 6 anos – ou seja, mais 4 anos de redução para um horizonte de 10 anos.

Neste panorama, a degradação prematura dos pavimentos e conseqüentemente a redução da vida útil exige maiores investimentos financeiros e planos de manutenção mais amplos para garantir condições adequadas de circulação. Sabe-se que a malha rodoviária brasileira necessita grandes investimentos e melhorias para estar nas condições ideais de tráfego.

Segundo Albano (2005), rodovias em situações precárias de conservação geram maiores custos para todo sistema produtivo. Trafegar nestas rodovias acarreta um aumento de até 45% no custo operacional dos veículos, exige o dobro do tempo de viagem e resulta num acréscimo no custo final dos produtos transportados. Adicionalmente o mesmo autor relata que estudos desenvolvidos demonstram que a inexistência de fiscalização do excesso de peso pode aumentar em até 33% os custos de manutenção das rodovias.

Em contrapartida, uma adequada infraestrutura viária com revestimento asfáltico em bom estado de conservação acelera o progresso sócio-econômico do país, repercutindo positivamente na qualidade de vida da população. Rodovias em boas condições não exigem atividades de manutenção de grande vulto e garantem conforto e segurança aos usuários. Investimentos na melhoria da malha rodoviária trazem ganhos na eficiência logística, diminuição dos custos de transporte, menor impacto ambiental e facilitam a integração nacional.

Diante da situação apresentada, é cada vez mais evidente o desafio de aumentar a vida útil dos pavimentos brasileiros; tornando-se cada vez mais importante que um pavimento atenda aos requisitos de durabilidade e segurança. Desta forma as alternativas apontam para duas possíveis etapas a serem percorridas.

O primeiro deles trata de uma intensificação da fiscalização de cargas, ou seja, um controle de tráfego e controle de peso dos veículos que garanta que os níveis de cargas para as quais os pavimentos são projetados atualmente sejam atendidos. Adicionalmente, através das análises do produto resultante desta fiscalização (banco de dados nacional) será possível a determinação das atuais condições do tráfego e das cargas nas rodovias a fim de implementar a segunda etapa.

Através do conhecimento das cargas praticadas (e principalmente dos níveis de sobrecarga) surge a necessidade de se quantificar seus efeitos no desempenho do pavimento e propor uma evolução dos métodos de dimensionamento. Considerando em projeto e nas normativas as cargas efetivamente praticadas estará se proporcionando uma maior durabilidade da pavimentação e redução dos custos de operação e conservação das rodovias.

De uso corrente nos projetos de dimensionamento de pavimentos no Brasil, os procedimentos preconizados pelo extinto Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), mas que ainda se encontram em vigor através do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o conhecido método do CBR, assim como o PRO10 e PRO11 são muito restritos em suas análises para as condições atuais de engenharia.

Adaptada na década de 1960 a metodologia apresenta uma série de limitações e simplificações, metodologia, essencialmente empírica sem embasamento nas propriedades fundamentais dos materiais, considera somente dois fatores, a saber: a resistência do subleito, determinado através do ensaio de CBR, que não é o mais adequado para solos tropicais, e o tráfego de projeto, não considerando o efeito do trincamento por fadiga, principal defeito dos pavimentos brasileiros.

Quanto ao tráfego, o método não considera o espectro de cargas, fazendo-se o uso apenas de um número equivalente de solicitações, ou seja, o conceito de Eixo Padrão Rodoviário. Atualmente, em termos de tráfego, as características dos veículos (tipo de eixo, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e tipo de suspensão) e das cargas são bem diferentes daquelas existentes há mais de 50 anos.

É consenso no meio profissional que, em virtude do significativo crescimento do tráfego comercial rodoviário e da disponibilidade nos dias atuais de ferramentas mais avançadas, há a necessidade de desenvolvimento de novos métodos mais racionais de dimensionamento de pavimentos que contemple as especificidades dos materiais de pavimentação empregados no país (analisar e maximizar as potencialidades dos materiais e suas inter-relações nas camadas), levando em consideração fatores importantes como características climáticas e uma completa caracterização do real tráfego atuante sobre a estrutura do pavimento.

Uma das grandes dificuldades de se implantar um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento é a definição regionalizada de “fatores laboratório-campo”, que permitam otimizar as estruturas previstas. Tal determinação implica a monitoração sistemática da evolução das condições estruturais e funcionais de pavimentos com materiais, espessuras de camadas e características mecânicas perfeitamente conhecidas, solicitados por tráfego medido com a maior acurácia possível, considerando ainda as condições ambientais circundantes, tais como parâmetros do clima e condições de drenagem.

Neste contexto, teve início no ano de 2009 a implantação de um programa de abrangência nacional denominado de “Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto Petrobrás/ANP”, desenvolvido em parceria com os principais Centros de Pesquisa e Universidades do país, visando desenvolver um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos – SDIMPA (Sistema de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos).

A presente Tese insere-se neste amplo programa que, através do monitoramento contínuo de desempenho dos trechos implantados, visando suprir a necessidade de informações sobre o comportamento dos pavimentos rodoviários brasileiros. Ao monitorar aspectos funcionais e

estruturais de diferentes tipos de pavimentos pretende-se reunir essas informações com as obtidas em outros Centros de Pesquisa e formar um importante banco de dados nacional.

É importante frisar a grande relevância do Programa, pois o mesmo tem a intenção de obter dados para análise e calibração de modelos por meio do “fator laboratório-campo”. Através deste banco de dados pretende-se validar o projeto de dimensionamento SISPAV desenvolvido na COPPE/UFRJ.

Observando a necessidade de, além de uma caracterização detalhada dos materiais em laboratório e avaliação da evolução dos parâmetros funcional e estruturais das seções monitoradas, conforme proposta do Programa Rede Temática, buscou-se na presente Tese aliar a esta pesquisa um monitoramento detalhado das cargas transportadas em nossas rodovias através da implantação inédita e completamente funcional de um novo sistema de pesagem dos veículos de carga na Região Sul do País.

A investigação relacionada à acurada caracterização do tráfego que solicita os pavimentos experimentais da Freeway é de caráter inovador. Apesar de já haver alguns estudos acerca da pesagem em movimento, não se teve acesso a informação de que houvesse no Brasil uma implantação plenamente funcional (2012-2013). A pesagem na velocidade operacional da via permite um constante monitoramento do tráfego, viabilizando uma completa investigação dos eixos de cargas dos veículos que trafegam na rodovia (100% dos veículos) além de proporcionar economia do custo de transportes (evitando longas filas para pesagem – balanças fixas).

Após o término da primeira fase, com a determinação do espectro de cargas circulantes na rodovia, iniciou-se uma segunda etapa na qual se propôs verificar qual o real impacto no pavimento ocasionado pelo espectro de cargas registrado. Esta fase da pesquisa foi intitulada como “Uso da tecnologia Weight-in-motion (WIM) para avaliação do desempenho de pavimentos asfálticos” e suas análises e conclusões fazem parte da presente tese.

O desenvolvimento da presente pesquisa está em consenso com as necessidades apontadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), com vistas na importância da malha rodoviária no desenvolvimento da economia através da adoção de novas tecnologias baseadas tanto na aplicação de novas misturas de materiais e novas técnicas de construção quanto no controle de tráfego e controle de peso dos veículos em busca de uma maior durabilidade da pavimentação redução dos custos de conservação e operação.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa aqui relatada teve por objetivo principal analisar o comportamento do pavimento rodoviário frente às reais cargas que o solicitam, estabelecendo, através do acompanhamento da construção e monitoramento sistemático de seções experimentais, a evolução de seus parâmetros de desempenho (funcionais e estruturais). Além disso, objetivou-se fazer-se uma análise comparativa de desempenho frente a mudanças no tráfego solicitante, principalmente ao considerar as variações de tolerância de cargas e circulação com excessos.

Nesse contexto, a presente Tese visa dar continuidade ao monitoramento de desempenho dos trechos experimentais já implantados no estado do Rio Grande do Sul (BR 290/RS – Freeway) e incorporar novos trechos ao Programa Rede Temática de Asfalto com o acompanhamento da construção de dois novos trechos na BR 448 - Rodovia do Parque.

1.2.1 *Objetivos Específicos*

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos, divididos em acompanhamento de campo, laboratório e análises de desempenho, e consistem em:

a) Atividades de campo:

- ✓ Acompanhar a construção dos trechos monitorados avaliando as técnicas construtivas empregadas e qualidade dos serviços de execução empregados, coletando-se amostras dos materiais empregados para verificação de qualidade e comportamento através de ensaios laboratoriais;
- ✓ Após implantação dos trechos novos, realizar análises periódicas para acompanhamento da evolução das condições estruturais do pavimento submetido ao tráfego por meio de medições periódicas de deflexões e de levantamentos de bacias defletométricas.
- ✓ Analisar a evolução das condições funcionais, de serventia e segurança do pavimento por meio de medições periódicas de Irregularidade Longitudinal (IRI), e avaliação do risco de derrapagem e hidroplanagem, através de medições periódicas de macrotextura e microtextura da camada de rolamento, além de avaliação dos defeitos superficiais, surgimento e evolução ao longo da vida útil do pavimento;

- ✓ Realizar estudos de tráfego que permitam avaliar de forma apurada as solicitações às quais o pavimento será submetido (contagem classificatória e contabilização de cargas). Determinação das cargas médias transportadas por eixo nos trechos avaliados e definição das características do tráfego quanto aos veículos de maior ocorrência, com emprego de equipamentos de pesagem dinâmica (WIM).

b) Modelagem de desempenho dos pavimentos:

- ✓ Analisar a evolução dos parâmetros funcionais e estruturais dos trechos monitorados, estabelecendo correlação entre modelos de previsão de desempenho existentes e as tendências observadas.
- ✓ Identificar e simular diferentes cenários de espectro de cargas, nos quais serão avaliados cenários ideais e reais observados, assim como cenários com sobrecargas, para avaliação das consequências dos distintos carregamentos na evolução dos parâmetros estruturais, funcionais e de segurança do pavimento.
- ✓ Através da completa caracterização laboratorial dos materiais empregados nas estruturas em monitoramento e definição do espectro de cargas, realizar análises da evolução de desempenho através de softwares.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta Tese está estruturada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo de INTRODUÇÃO foi apresentado o tema de pesquisa, justificativa e relevância para o meio técnico e científico, identificando os principais objetivos que se propôs alcançar.

No segundo capítulo, intitulado REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, é apresentada uma síntese da literatura científica sobre assuntos pertinentes ao entendimento e desenvolvimento desta pesquisa, com considerações sobre o sistema de transportes no Brasil e a importância de uma infraestrutura em boas condições de conservação é abordada na discussão sobre a atual situação da malha rodoviária nacional. Realiza-se ainda uma análise sobre a influência do tráfego nas condições de operação e conservação do sistema rodoviário. Além disso são abordados assuntos pertinentes à fiscalização das cargas transportadas e sistemas de pesagem convencionais e inovações como os sistemas de pesagem dinâmicas de alta velocidade.

No terceiro capítulo, METODOLOGIA DE PESQUISA, é apresentado o programa experimental de Monitoramento de Desempenho dos trechos implantados através do Programa Rede Temática de Asfaltos no estado do Rio Grande do Sul. Juntamente com o monitoramento de desempenho, realiza-se o Monitoramento de Tráfego através de estudos de tráfego com dados obtidos através de contagens classificatórias e o Monitoramento de Cargas através da implantação e operacionalização de um equipamento de pesagem dinâmica de alta velocidade (HS-WIM). Através dos dados obtidos organiza-se uma identificação e a simulação de distintos cenários de espectros de cargas para verificação de sua influência no desempenho da estrutura do pavimento analisado.

A análise dos resultados está dividida em dois capítulos, primeiramente são apresentados os resultados dos estudos de tráfego no capítulo quatro DEFINIÇÃO E ANÁLISE DO TRÁFEGO SOLICITANTE e posteriormente no capítulo cinco ANÁLISE DOS RESULTADOS DE DESEMPENHO DOS TRECHOS MONITORADOS são apresentados os acompanhamentos de desempenho dos quatro trechos em monitoramento, além dos resultados das simulações de desempenho considerando distintos cenários de espectros de cargas na Rodovia BR-290/RS.

Finalmente no sexto capítulo, CONSIDERAÇÕES FINAIS são apresentadas as considerações mais relevantes observadas quanto ao estudo de tráfego, desempenho das estruturas, cenários simulados e a importância geral da análise levando em consideração as variáveis observadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se a seguir considerações importantes sobre o sistema de transportes no Brasil, tais como distribuição modal, importância de uma infraestrutura em boas condições de conservação e a atual situação da malha rodoviária nacional. Faz-se uma síntese sobre desempenho de pavimentos asfálticos, mecanismos de degradação e importância do tráfego na manifestação prematura destes mecanismos.

Neste mesmo contexto, são abordados assuntos referentes ao transporte de cargas nas rodovias brasileiras, principalmente no que diz respeito à fiscalização de cargas transportadas (sobrecarga). É analisada a atual situação e são apresentadas algumas perspectivas futuras de tecnologias para melhorias no processo de fiscalização, que na atualidade encontra-se muito defasado e precário.

Adicionalmente realiza-se uma abordagem sobre a necessidade de melhorias nas metodologias de dimensionamento de pavimentos rodoviários visando atender à atual demanda de tráfego circulante através do emprego de novas tecnologias, materiais e métodos para elevar a vida de serviço da estrutura projetada, evitando a ocorrência de degradações prematuras em função de projetos muitas vezes inadequados e solicitações de cargas superiores às especificadas pela legislação.

2.1 SÍNTESE DA MATRIZ DE TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL

O setor de transporte possui um importante papel na indução do desenvolvimento econômico e na integração nacional. Sua relevância vai além da simples ideia de ligação entre zonas produtoras e consumidoras, contribui para a geração de empregos, proporcionando uma melhor distribuição de renda. Investimentos em uma boa infraestrutura não somente encurtam as distâncias, mas também, melhoram e agilizam a mobilidade contribuindo inclusive para geração e desenvolvimento de novas tecnologias.

A infraestrutura de transportes é um pré-requisito para o desenvolvimento, tanto regional quanto em âmbito nacional. Segundo, VIANA (2007) os países que têm boa infraestrutura de transportes não a têm por serem desenvolvidos. Antes, são desenvolvidos porque cuidaram, no devido tempo, das suas estradas e das vias de transporte de todo tipo.

Uma boa infraestrutura é elemento primordial no desenvolvimento, principalmente no caso do Brasil, um país de dimensões continentais onde a infraestrutura de transportes tem importância mais acentuada devido à função de transferir insumos para regiões com distâncias de transporte consideráveis.

O transporte está intimamente ligado às diversas atividades, sendo assim, é um meio que viabiliza de forma econômica os deslocamentos para satisfação de necessidades pessoais ou coletivas, sendo que, os maiores benefícios produzidos são a mobilidade e acessibilidade. O transporte é o principal responsável pela movimentação de um fluxo material, de forma eficaz e eficiente, desde um ponto fornecedor até um ponto consumidor. Por isso, é o responsável pela grande parcela dos custos logísticos dentro da maioria das empresas e possui participação significativa no PIB em nações com relativo grau de desenvolvimento.

2.1.1 Distribuição modal: predominância do modal rodoviário

Matriz de transporte de um país corresponde ao conjunto dos meios de circulação usados para transportar mercadorias e pessoas. São cinco os modais de transporte de cargas: rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo. Cada modal apresenta seus próprios custos e características operacionais, o que os tornam mais adequados para certos tipos de operações e produtos.

Todas as modalidades têm suas vantagens e desvantagens. A escolha pela melhor opção de transporte é feita através da análise da natureza e características da mercadoria, analisando os custos, características de serviços, rotas possíveis, capacidade de transporte, versatilidade, segurança e rapidez. O equilíbrio entre os diversos modais é de grande importância para o sistema de transportes.

Ao analisar o sistema de transportes brasileiro observa-se que o mesmo é formado basicamente por uma extensa matriz rodoviária, ou seja, baseada em uma matriz de transporte distorcida na utilização dos modais, levando-se em consideração principalmente as dimensões de nosso país e a vocação e potencial agrícola e de extração mineral.

No Brasil o sistema rodoviário tem papel de destaque no transporte de passageiros e principalmente de cargas, apesar da enorme costa e dos rios navegáveis. Este fato é decorrente de um processo que se estendeu por várias décadas e onde predominou o crescimento rápido e desproporcional do segmento rodoviário relativamente ao conjunto das demais modalidades.

Um país de dimensão continental como o Brasil, que movimenta produtos internamente e se volta para a exportação de um volume considerável de grãos e minérios produzidos em áreas distantes do litoral, deveria utilizar de forma equilibrada as diferentes modalidades de transporte. O principal resultado dessa matriz desequilibrada é o alto custo do transporte de carga no país (VIANA, 2007).

Na imagem da Figura 1 a seguir é apresentada a configuração da matriz de transportes brasileira segundo Medina e Motta (2015), demonstrando o forte desequilíbrio entre os diferentes modais. Estes valores apontam para a necessidade de readequações para que se promova maior competitividade e um desenvolvimento econômico sustentável.

Como pode ser observado, mais de 61% do transporte de cargas é realizado por rodovias. Menos de um quarto da carga é levada por ferrovias, e apenas 13,6% seguem por hidrovias. O restante do transporte fica a cargo do meio dutoviário (4,2%), usados basicamente para transporte de gás e petróleo, e com o transporte aéreo que representa 0,4% do transporte de cargas realizados no país.



Figura 1 – Matriz de transporte brasileira (Adaptado de Medina e Motta, 2015)

Este desequilíbrio na matriz de transporte através da priorização do modal rodoviário para transporte de cargas acaba gerando demandas crescentes de conservação e manutenção das rodovias, não simplesmente pelo elevado volume de veículos de cargas, mas principalmente pelo trânsito destes veículos com cargas excessivas, fora dos limites legais estabelecidos.

Como forma de solucionar estes problemas, que acabam gerando uma degradação prematura dos pavimentos rodoviários brasileiros, deve-se trabalhar em duas frentes distintas. Primeiramente há a necessidade de promover um equilíbrio entre os modais, incentivando de forma mais incisiva a utilização principalmente dos modais ferroviário e hidroviário. E, em um

segundo momento, priorizar um maior desempenho dos pavimentos rodoviários através da utilização de técnicas e materiais adequados para os níveis de solicitação encontrados. Além disso, uma adequada fiscalização das cargas transportadas é primordial para garantir um desempenho satisfatório da estrutura projetada, sem o surgimento prematuro de mecanismos de degradação em função dos excessos de cargas.

Segundo projeções no setor de transportes, em um horizonte de 20 anos (2005-2025) será possível equilibrar e racionalizar a matriz de transportes do País e essa tendência vem sendo constatada ao longo das décadas. O Governo Federal, através do Ministério dos Transportes, vem apresentando metas de planejamento de longo prazo no trânsito e transporte brasileiro, e, de acordo com o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT, 2012), a redistribuição da matriz de transporte para obter maior equilíbrio entre os principais modais para 2025.

No gráfico da Figura 2 é apresentada distribuição modal para os anos de 1996 e 2005 onde é possível observar uma diminuição do percentual de utilização das rodovias e um aumento para os modais ferroviários e hidroviários. Nas projeções para o ano de 2025 demonstra-se uma priorização destes modais e uma redução de mais de 50% para a participação do meio rodoviário onde os três modais, hidroviário-ferroviário-rodoviário, apresentam-se com percentuais equivalentes de participação na movimentação de cargas realizadas no território nacional.

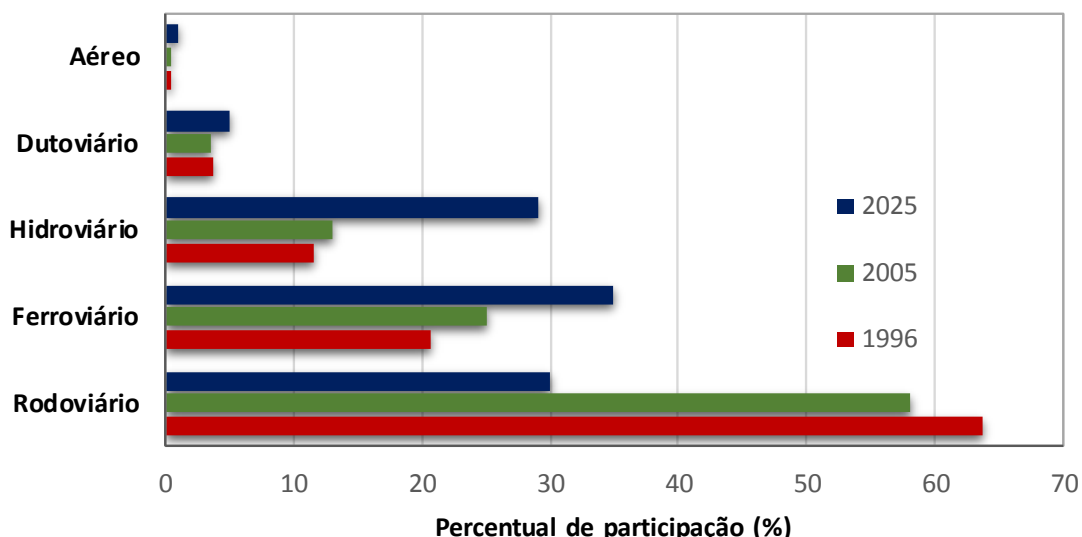


Figura 2 – Projeções reestruturação da matriz de transportes (PNLT, 2012)

Contudo, estes percentuais demonstrados pelo PNLT apresentam divergências com aqueles atualmente apresentados por Medina e Motta (2015), o que pode demonstrar um não cumprimento das estratégias propostas para readequação da matriz de transportes conforme planejado.

2.1.2 Modal Rodoviário: Características, importância e estado de conservação

Demonstrada a grande importância do modal rodoviário no transporte de cargas do país, a necessidade de rodovias em boas condições de trafegabilidade e segurança é indiscutível. Uma adequada infraestrutura viária com revestimento asfáltico em bom estado de conservação, além de proporcionar benefícios diretos aos usuários como a melhoria dos níveis de conforto e segurança, ainda possibilita a redução dos custos operacionais dos veículos, acelera o progresso socioeconômico do país favorecendo o escoamento adequado da produção agrícola e industrial, incrementando assim as riquezas nacionais.

No Brasil, o desenvolvimento do setor de transporte se iniciou com a navegação costeira, passando por um período que favoreceu o modo ferroviário, durante as décadas de 1930 e 1940, até a expansão e o predomínio das rodovias na matriz de transportes do País, resultado, entre outros, do incentivo à indústria automobilística e da política de subsídios concedidos ao transporte rodoviário a partir da década de 1950.

Entretanto, independentemente das razões históricas e econômicas que convergiram para a consolidação das rodovias como principal modalidade de transporte no país, a sua utilização de forma ineficiente e a ausência de um incentivo à multimodalidade implicam custos logísticos significativamente altos, comparativamente a outros países de características geográficas similares.

No Brasil, apesar de o modal rodoviário ser responsável pela grande maioria de transporte de cargas e passageiros, o setor apresenta carências históricas, tendo sua situação é agravada por uma oferta insuficiente de infraestrutura rodoviária, tanto em termos de extensão quanto em qualidade das vias.

A qualidade da malha rodoviária brasileira ainda está longe dos padrões internacionais, considerando que apenas 11,8% das rodovias são pavimentadas e grande parte encontra-se em mau estado de conservação, principalmente quando se observa aquelas sob administração pública com apenas 34,1% da extensão analisada em estado Ótimo ou Bom, sendo a grande maioria classificada de Regular a Péssimo (65,9%) (Pesquisa CNT, 2015). Estes valores são surpreendentes em um país fortemente dependente do modal rodoviário. Este panorama tem ocasionado diversos prejuízos econômicos ao país, entre eles a perda de produção, aumento do custo operacional dos veículos, maiores riscos de acidentes, entre outros.

Diante do contexto apresentado, a qualidade das rodovias brasileiras apresenta deficiências que comprometem a realização de deslocamentos internos de forma segura, rápida e eficiente. Fica evidenciado que a infraestrutura deve fornecer suporte adequado para que o setor de transporte rodoviário, de passageiros e de cargas, desempenhe seu papel de forma eficaz.

Segundo o Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT, 2012), baixos níveis de investimento em infraestrutura nas últimas décadas geraram sérios problemas a serem superados, distribuídos em todos os modais de transporte, gerando ineficiências, custos adicionais e maiores riscos de acidentes.

No gráfico da Figura 3 apresenta-se um resumo dos investimentos (% PIB) do Ministério dos Transportes de 1975 a 2010, como pode ser observado, até a década de 1990 os investimentos apresentaram uma trajetória decrescente com significativa redução dos valores aplicados no setor de transportes. Nas décadas de 1990 e início dos anos 2000, o investimento em infraestrutura foi sensivelmente reduzido, permanecendo praticamente estagnado durante o período. Somente após os anos de 2003/04 gradativamente foram sendo retomados os investimentos no setor.

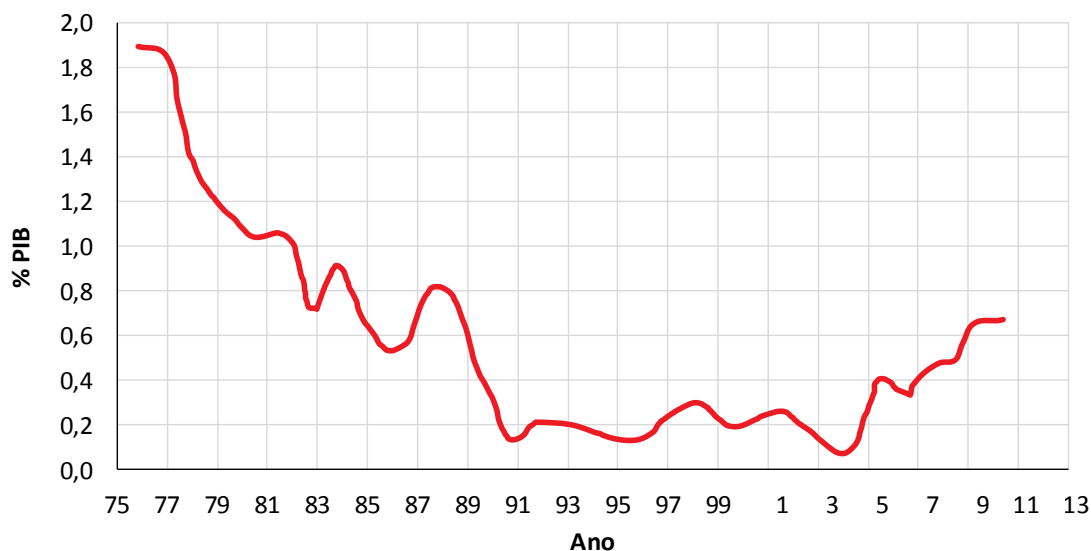


Figura 3 – Investimentos do Ministério dos Transportes (%PIB) Fonte: PNL, 2012

Ao analisarmos a evolução da frota de veículos, tanto de passageiros quanto de veículos de carga, observa-se que seu número veículos apresentou um crescimento significativo nos últimos anos. De 2005 a 2014, a quantidade de veículos no país cresceu 106,1%, o que significa um crescimento médio anual de 8,4% em uma década (DENATRAN, 2015).

Idealmente, essa evolução da frota deveria ser acompanhada de uma adequação da capacidade da infraestrutura rodoviária de forma a compensar o aumento no volume de veículos que a utilizam em seus deslocamentos de modo a garantir a segurança e a eficiência nos deslocamentos de passageiros e de cargas. No entanto, esse cenário não condiz com a realidade brasileira (Pesquisa CNT, 2015).

Enquanto o número de veículos apresentou um crescimento significativo (1975 - 2003), os investimentos decrescentes no sistema de transportes levaram a um desgaste mais acentuado dos pavimentos rodoviários, provocando degradações cada vez mais prematuras que podem pôr em risco a segurança dos usuários.

Em função da necessidade de crescimento da malha rodoviária brasileira e melhorias em seu estado de conservação, investimentos em manutenção de rodovias em estado de degradação, duplicação de rodovias com grande fluxo de tráfego e construção de novas rodovias começou a aumentar gradativamente a partir do ano de 2003.

Segundo o Ministério dos Transportes, em âmbito nacional, vultosos investimentos vêm sendo destinados à recuperação da infraestrutura rodoviária brasileira. O Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) manteve a prioridade dos investimentos no setor de transportes, com investimentos de R\$ 80 bilhões (PAC1: 2007-2010) e R\$ 104 bilhões (PAC2: 2011-2014) (PNLT, 2012).

A proposta de continuidade do PAC tem seu foco na prioridade em investimentos importantes e diretrizes nos distintos modais de transporte, basicamente, considerando o modal rodoviário, objeto em discussão no momento.

As diretrizes de investimento no setor conforme mencionado no Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT, 2012) são as seguintes:

- Expansão do sistema rodoviário:

Duplicação e adequação de capacidade de eixos estratégicos:

- ✓ Eliminação de pontos de estrangulamento e duplicação de trechos estratégicos;
- ✓ Adequação de capacidade em pontos críticos através de implantação de faixas adicionais (terceira faixa), alargamento, multivias, entre outros;
- ✓ Melhoria nos acessos aos portos marítimos;

Construção e pavimentação de eixos estratégicos:

- ✓ Incorporação de novas regiões ao processo de desenvolvimento nacional;
- ✓ Promoção da integração física do Brasil com os países vizinhos;
- ✓ Complementação de rodovias estruturantes.

Construção de contornos e travessias em áreas urbanas:

- ✓ Separação do tráfego de longa distância do tráfego local, com redução de congestionamentos, tempos de viagem e acidentes.

- Manutenção e segurança rodoviária

- ✓ Preservação do patrimônio rodoviário existente, com serviços de recuperação, conservação e sinalização em toda a malha rodoviária federal;
- ✓ Melhorar a qualidade da malha com contratos de Recuperação/Conservação de longo prazo (5 anos), garantindo vida útil de 10 anos para a rodovia, em substituição a contratos de curto prazo (até 2 anos);
- ✓ Meta de elevar o percentual da malha classificado como “bom e excelente” que atualmente é de 36,2% para 60% e eliminando o percentual correspondente a “mau e péssimo” (conforme avaliação do SGP do DNIT).

Plano nacional de pesagem

- ✓ Controle da sobrecarga dos veículos, preservando a vida útil das rodovias e reduzindo riscos de acidentes ocasionados por veículos transitando fora dos limites legais estabelecidos (Implantação de Sistemas WIM);

Controle de Velocidade

- ✓ Redução do índice de acidentes através da implantação de equipamentos de controle de velocidade visando aumentar a segurança de trafegabilidade oferecida aos usuários e reduzir o número e a gravidade dos acidentes;

- Estudos e projetos

- ✓ Garantir um portfólio de projetos para subsidiar o programa de investimentos em infraestrutura rodoviária (contexto da pesquisa – formação banco de dados).

Observa-se, nos itens acima apresentados, um excelente plano de direcionamento de investimentos em diferentes áreas na infraestrutura rodoviária, muitas delas com carências significativas, tais como, manutenção adequada da malha rodoviária existente com preservação do patrimônio rodoviário existente e expansão em diferentes níveis de importância.

O mapa da Figura 4 apresenta os principais investimentos no setor rodoviário realizados em âmbito nacional dentro das categorias acima descritas, segundo o Ministério dos Transportes.



Figura 4 – Investimentos em nível nacional PAC Rodoviário (BRASIL, 2012)

No Rio Grande do Sul, obras reivindicadas historicamente pela sociedade estão em fase avançada de execução e/ou concluídas. Destacam-se a obra de modernização e ampliação de capacidade da BR-101/RS, a construção da BR-448/RS, trecho Sapucaia do Sul-Porto Alegre, a duplicação da BR-392/RS trecho Rio Grande-Pelotas, a duplicação da BR 116/RS, trecho Porto Alegre – Pelotas, Duplicação da BR 386 trecho Tabai-Estrela, entre outras.

No contexto apresentado, os projetos de dimensionamento de pavimentos voltaram a ocupar um espaço importante no cenário nacional, enfrentando um novo desafio, visto que o tráfego comercial que solicita os pavimentos tem crescido de forma exponencial e sua consideração nos métodos de dimensionamento não tem acompanhado esta evolução, assim como demais fatores que, de forma simplificada são ainda consideradas nos dimensionamentos das estruturas de pavimentos rodoviários.

Uma área que merece destaque especial diz respeito ao plano nacional de pesagem, onde observa-se a preocupação com o controle das cargas transportadas pelas rodovias, principalmente com os índices de sobrecarga dos veículos, que sabidamente reduz de forma significativa a vida útil dos pavimentos rodoviários. Além disso, o transporte com excesso de cargas aumenta o risco de acidentes, comprometendo a segurança de todos os usuários da via.

Nos itens a seguir serão apresentados assuntos relevantes relacionados ao desempenho de pavimentos rodoviários nos quais analisa-se a importância das cargas transportadas pelas nossas rodovias, com uma revisão sobre os principais sistemas de pesagem de veículos de carga atualmente utilizados no contexto nacional e internacional para controle de cargas além de uma retratação do cenário atual de fiscalização e problemas relevantes a solucionar.

2.2 TRANSPORTE RODOVIÁRIO: FISCALIZAÇÃO DE CARGAS

Conforme dados apresentados anteriormente na síntese da matriz de transporte demonstra-se a importância do transporte rodoviário de cargas em nosso país. A estratégia de desenvolvimento adotada no país confere ao setor a responsabilidade por mais de 61% da movimentação das cargas (Medina e Mota, 2015).

De acordo com Albano (2004), que traz a importância do setor rodoviário para o país, uma nação fica literalmente paralisada se houver interrupção dos serviços prestados pelo transporte por rodovias, principalmente em um país de dimensões continentais como o Brasil, onde este risco torna-se ainda mais crítico. Sem o transporte rodoviário, produtos essenciais não chegariam às mãos dos consumidores, indústrias não produziriam e o comércio seria mínimo.

Segundo o mesmo autor, o setor pode ser caracterizado por suas amplas externalidades. Mais do que viagens e deslocamentos, transporte é um serviço horizontalizado que viabiliza os demais setores, afetando diretamente a segurança, a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico do país.

Nos itens a seguir serão apresentados assuntos importantes relacionados à legislação referente ao controle de cargas transportadas, principais sistemas de pesagem de veículos utilizados em âmbito nacional e internacional além de um panorama da atual situação de controle e fiscalização de cargas nas rodovias brasileiras.

2.2.1 *Legislação nacional para fiscalização e controle de cargas*

Os veículos comerciais devem obedecer a certos limites e as cargas por eixo não podem ser superiores a determinados valores, segundo a legislação em vigor. A atual legislação referente à pesagem de veículos em vigor no Brasil é constituída por uma série de artigos cuja origem é o Decreto nº 62.127/68 que aprovou o Código Nacional de Trânsito.

O Decreto nº 62.127/68 conhecido como a Lei da Balança e aprovou o Regulamento do Código Nacional de Trânsito e estabeleceu as condicionantes para o transporte de cargas rodoviárias. Em 1985 a Lei nº. 7.408 de 25/11/1985 que estabeleceu uma tolerância máxima de 5% sobre o Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Transmitido por Eixo (BRASIL, 1985).

Em 1990 o Decreto nº 98.933 de 07/02/1990 alterou o limite do Peso Bruto Total Transmitido pelo ESRS e regulamentou o ETD constituído por dois eixos com seis rodas (BRASIL, 1990). Já a Resolução nº. 12 de 06/02/98 que estabeleceu limites de peso e dimensões para veículos por vias terrestres (CONTRAN, 1998a).

Os limites de carga na rede rodoviária brasileira são fiscalizados de acordo com a Resolução CONTRAN nº 104/99 (1999a) que define critérios de consideração do peso bruto total - PBT ou peso bruto total combinado - PBTC para aferição do peso para aplicação de multas, isentando os excessos de peso verificados nos eixos isolados ou conjuntos de eixos.

Artigo 3º - “O percentual de tolerância de 7,5% no Peso por Eixo permanecerá como o estabelecido na Resolução nº 102/99 do CONTRAN e o percentual de tolerância de 5% para o Peso Bruto Total e Peso Bruto Total Combinado permanece como estabelecido na Lei nº 7.408/85”.

Artigo 4º - “A fiscalização dos limites de peso, por meio do peso declarado na nota fiscal, será exercida somente naquelas rodovias desprovidas de equipamentos de pesagem”.

Artigo 5º - “Quando o peso aferido estiver igual ou inferior ao Peso Bruto Total ou Peso Bruto Total Combinado estabelecidos para o veículo acrescido da tolerância de 5% embora havendo excesso de peso em alguns dos eixos ou conjuntos de eixo, não será aplicada a multa. Nesse caso a carga deverá ser remanejada ou ser efetuado transbordo, de modo a que os excessos por eixo sejam eliminados”.

Artigo 6º - “Quando o peso aferido estiver acima do Peso Bruto Total ou Peso Bruto Total combinado estabelecido para veículo, acrescido da tolerância de 5%, aplicar-se-á multa correspondente com peso excedente a parcela relativa à tolerância”.

Parágrafo único – O veículo somente poderá prosseguir viagem depois de efetuado o transbordo.

Os pesos por eixo receberam na Resolução n° 104 de 21/12/99 do CONTRAN a alteração da tolerância ao excesso de peso de 5% para 7,5% sobre a carga por eixo e de 5,0% sobre o PBT.

Peterlini (2007) salienta a evidência de que os transportadores carregam seus veículos considerando a tolerância de 7,5% permitida pela Resolução do CONTRAN como ganho real de sobrecarga e não como tolerância do próprio equipamento de pesagem, sem contar com a isenção de multas dos excessos nos eixos dada pela Resolução n° 104 de 21/11/1999, que considerou apenas o PBT com tolerância de 5%.

O autor reforçava, já naquela época, que tais fatos fizeram com que ficasse evidente a necessidade da imediata revogação de tais Resoluções do CONTRAN, por nunca terem levado em conta o caráter maléfico à preservação dos pavimentos que as permissividades legais desses procedimentos possuíam.

Conforme estabelece ainda a Resolução n°. 258/07 do CONTRAN, até 31 de dezembro de 2008, era admitida uma tolerância máxima de 7,5 % (sete e meio por cento) sobre os limites de peso bruto transmitido por eixos às superfícies das vias públicas. Os “Pesos Máximos por Eixo” são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Cargas máximas legais segundo regulamentação CONTRAN

EIXO ou CONJUNTO DE EIXOS	RODAGEM	SUSPENSÃO	ENTRE-EIXOS (m)	CARGA (kg)	TOLERÂNCIA (7,5%)
Isolado	simples	direcional	-	⁽¹⁾ 6.000	6.450
Isolado	simples	direcional	-	⁽²⁾ 6.000	6.450
Isolado	dupla	-	-	10.000	10.750
Duplo	simples	direcional	-	12.000	12.900
Duplo	dupla	tandem	>1,20 ou ≤ 2,40	17.000	18.280
Duplo	dupla	não em tandem	>1,20 ou ≤ 2,40	15.000	16.130
Duplo	simples+dupla	especial	< 1,20	9.000	9.680
Duplo	simples+dupla	especial	>1,20 ou ≤ 2,40	13.500	14.520
Duplo	Extralarga ⁽⁴⁾	pneumática	>1,20 ou ≤ 2,40	17.000	18.280
Triplo ⁽³⁾	dupla	tandem	>1,20 ou ≤ 2,40	25.500	27.420
Triplo ⁽³⁾	Extralarga ⁽⁴⁾	pneumática	>1,20 ou ≤ 2,40	25.500	27.420

⁽¹⁾ Para rodas com diâmetro inferior ou igual a 830 mm.

⁽²⁾ observada a capacidade e os limites de peso indicados pelo fabricante dos pneumáticos e diâmetro superior a 830 mm.

Na Resolução do CONTRAN n° 258 de 30/11/2007 a tolerância para os excessos de peso nos eixos foi alterada para 5%, revogando as Resoluções n° 102/99, 104/99 e 114/00 que tratavam sobre a tolerância máxima no PBT e peso bruto por eixo. A redução da tolerância de 7,5% para 5% nos eixos foi adiada (pela quinta vez) até dezembro de 2011, a partir da Resolução n° 365/10 do CONTRAN.

Embora o art. 5º da Resolução nº 258/07 estabeleça, na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária, a tolerância máxima de 5% sobre os limites de pesos regulamentares, o art. 17 da mesma Resolução permitiu, excepcionalmente, a tolerância de 7,5% para os pesos por eixo, inicialmente até 31 de dezembro de 2008. Após seguidas prorrogações, a Resolução nº 403, de 26 de abril de 2012, prorrogou novamente a citada tolerância de 7,5% para os pesos por eixo até o dia 31 de dezembro de 2013.

Recentemente foi aprovada a nova Resolução do CONTRAN, nº 489/2014, ampliando o limite de tolerância nos eixos dos caminhões de 7,5% para 10%. A proposta de aumento da tolerância é fruto de reivindicações dos transportadores e já vinha sendo debatida. O novo percentual de 10% só irá valer para os veículos que estiverem dentro dos limites do PBT. Para os que excederem, continuará valendo a regra anterior. A contrário do que é anunciado e defendido por algumas classes, o aumento da tolerância por eixo afeta sim a vida útil dos pavimentos, e de forma muito significativa, conforme visto anteriormente.

A Resolução nº 526 de 29 de abril de 2015 altera os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30 de novembro de 2007, do Conselho Nacional de Trânsito –CONTRAN, que regulamenta os artigos 231 e 323 do Código de Trânsito Brasileiro que fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.

Segundo a Resolução nº 526, é redefinido o Art. 5º da Resolução CONTRAN nº 258, de 30 de novembro de 2007, passa a vigorar com a seguinte redação:

Artigo 5º - “Na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária serão admitidas as seguintes tolerâncias:

I – 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC);

II - 10% (dez por cento) sobre os limites de pesos regulamentares por eixo de veículos transmitidos à superfície das vias públicas.

Parágrafo Único. No carregamento dos veículos, a tolerância máxima prevista neste artigo não pode ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação fixada pelo CONTRAN.

Conforme descrito claramente no inciso II anteriormente apresentado, a tolerância máxima prevista não pode ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação fixada pelo CONTRAN, porém esta prática é discriminadamente praticada pelos transportadores, favorecendo dessa forma consideravelmente à degradação prematura da estrutura dos pavimentos.

Com base na Lei da Quarta Potência, tomando como exemplo um pavimento projetado para uma vida útil de 15 anos, com sobrecargas de 5%, 7,5% e 10% terá sua vida útil reduzida consideravelmente conforme a análise apresentada a seguir na Figura 5.

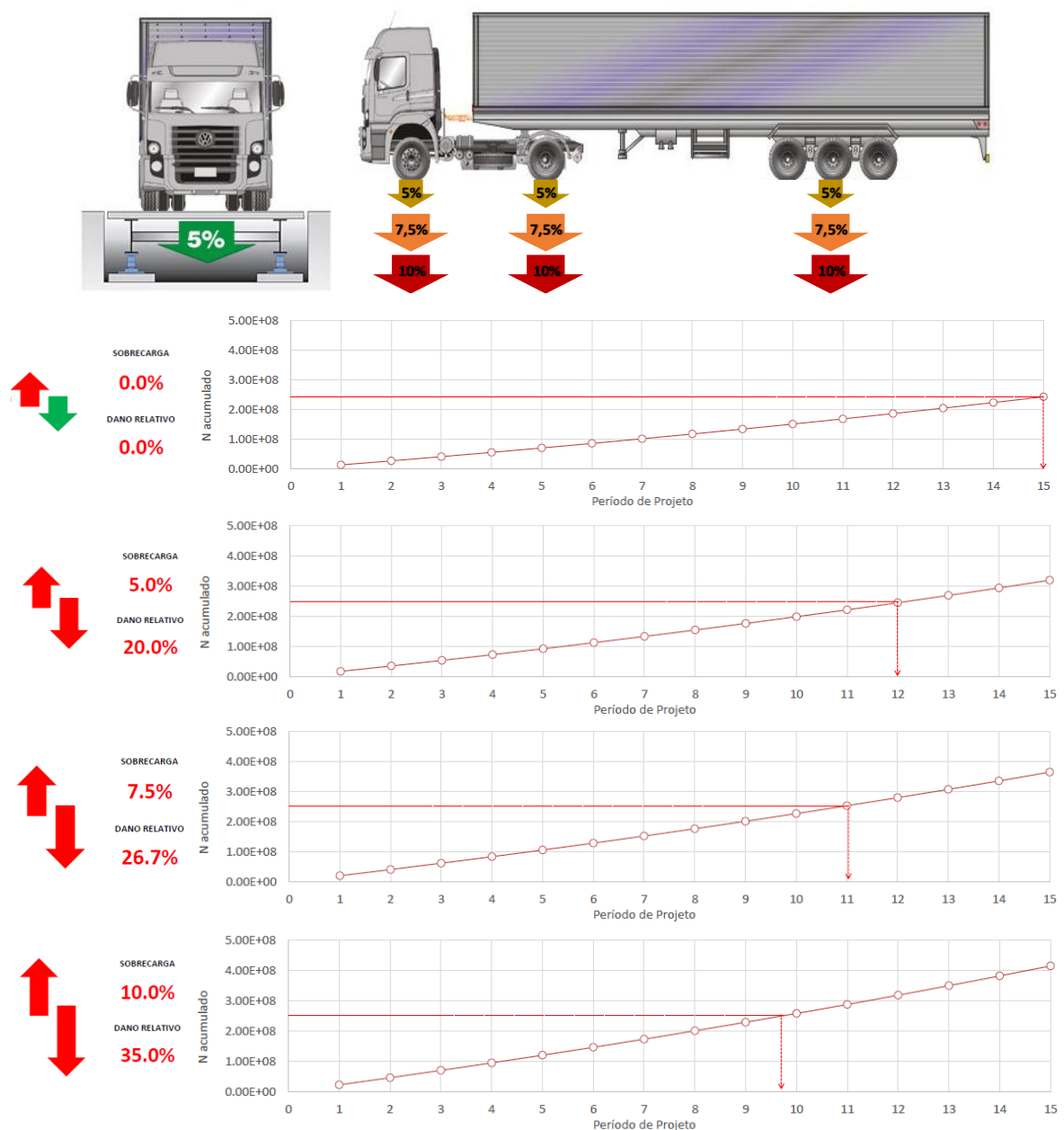


Figura 5 – Redução da vida útil de um pavimento em função da sobrecarga (Brito *et al*, 2013)

Dados e informações sobre excessos de carga praticados no Brasil são muito escassos em relação aos existentes em países desenvolvidos. Relatórios de pesagens nas balanças em operação espelham simplesmente informações a respeito de amostras aleatórias de veículos carregados encaminhados para a pesagem para verificação de sobrecargas.

Um dos estudos de grande relevância de levantamento de dados de pesagens no sul do país foi realizado em 2009 através da pesquisa RDT ANTT/CONCEPA intitulada “Análise dos efeitos de excessos de cargas e de alterações na composição de misturas asfálticas no desempenho de pavimentos típicos da região Sul do País” realizada na própria BR-290/RS – Freeway.

Segundo dados apresentados na referida pesquisa, a síntese de pesagens realizadas nos postos de pesagem localizadas na BR-290/RS, destacando-se os excessos de carga, bem como as cargas máximas por eixo medidas ao longo do período em análise. Na balança localizada na Pista Norte foram pesados 41.537 veículos comerciais, totalizando 163.171 eixos, entre 5 de janeiro e 30 de outubro de 2009. Já na Balança Sul foram pesados 61.820 veículos comerciais, totalizando 308.004 eixos, no período compreendido entre 5 de janeiro de 2009 e 20 de janeiro de 2010.

Tabela 2 – Análise de cargas BR-290/RS: NÚÑEZ et al.,2010

BALANÇA NORTE				
% de veículos com PBT superior ao PBT limite	17%	Carga máxima (tf)		
% de eixos simples com carga superior ao limite	14%	ES	ETD	ETT
% de eixos tandem duplos com carga superior ao limite	5%	17,160	29,210	56,040
% de eixos tandem triplos com carga superior ao limite	2%			
BALANÇA SUL				
% de veículos com PBT superior ao PBT limite	14%	Carga máxima (tf)		
% de eixos simples com carga superior ao limite	11%	ES	ETD	ETT
% de eixos tandem duplos com carga superior ao limite	7%	17,500	29,570	57,580
% de eixos tandem triplos com carga superior ao limite	6%			

Como principais resultados obtidos, a pesquisa destaca o excesso de carga como uma realidade da rodovia, sendo que 14% e 17% dos veículos pesados nas Balanças Sul e Norte apresentaram PBT superior ao limite, com excessos de carga semelhantes nos dois sentidos da rodovia.

Os maiores excessos de carga foram observados nos eixos simples: 11% na Balança Sul e 14% na Balança Norte. A máxima carga de eixo simples medida foi de 17,5 tf, que de acordo com a AASHTO causa o mesmo dano que 26,9 cargas de eixo padrão; a incidência de excesso de carga é menor nos eixos tandem duplos (7 e 5%) e triplos (6 e 2%).

A maior carga de eixo tandem duplo pesada foi de 29,57 tf, que corresponde a aproximadamente 16,2 cargas de eixo padrão. A maior carga de eixo tandem triplo foi de 57,58 tf, que de acordo com a AASHTO causa o mesmo dano que 48,5 cargas de eixo padrão; e os excessos de carga podem ser muito elevados, o que torna imperioso o funcionamento de balanças, de forma a coibir os excessos que encurtam de sobremaneira a vida dos pavimentos.

Estes dados obtidos no ano de 2009 serão posteriormente confrontados com os dados de carregamento do tráfego observado através da Pesquisa WIM no período atual através de um contínuo monitoramento do tráfego.

2.2.2 *Sistemas de fiscalização e controle de cargas*

Neste item será apresentado uma breve revisão sobre os sistemas de pesagem de veículos, como sistemas estáticos e dinâmicos de baixa velocidade como os utilizados nos Postos de Pesagem Veicular (PPV) implantados nas rodovias brasileiras e sistemas incipientes no país, especialmente os sistemas de pesagem dinâmicos de alta velocidade conhecidos como sistemas “Weigh-in-Motion” (WIM).

De uma forma geral, qualquer pesagem para fiscalização de veículos comerciais rodoviários pode ocorrer de duas formas: na primeira, todos os veículos são fiscalizados através de postos de pesagem fixa ou móvel; na segunda, apenas os veículos potencialmente em desconformidade com os pesos máximos admissíveis são chamados para uma pesagem estática ou de baixa velocidade com o propósito de verificar a potencial infração. Constatada a não conformidade, é aplicada a penalidade prevista em Lei, e, nos casos previstos, o veículo é retido até que seja descarregado e removido o excesso de carga pelo operador (Brito *et al*, 2013).

Tradicionalmente os procedimentos de controle de carga são realizados através de sistemas de pesagem estática. Este foi o único método aprovado pela metrologia legal, até meados dos anos 1990 na maioria dos países.

São sistemas com alta participação humana e, conseqüentemente, baixo nível de eficiência e eficácia na fiscalização. Neste caso, a operação consiste na seleção visual por agente humano de veículos suspeitos. Estes veículos são comandados para fora do fluxo, e pesados em balança estática. Constatada a não conformidade, o veículo é retido no local até que seja emitida por agente notificação de multa, e, nos casos previstos, providenciado pelo transportador o descarregamento e remoção do excesso de carga.

Basicamente existem três tipos de dispositivos de pesagem estática:

- **Sistemas fixos:** são permanentemente montados no pavimento, geralmente em estruturas ou plataformas de concreto;
- **Sistemas semi-portáteis:** utilizam ranhuras permanentes e instalações na rodovia, mas são instaladas balanças portáteis apenas utilizadas durante as operações de fiscalização/pesagem;
- **Sistemas portáteis:** são sistemas de balanças de roda ou eixo que são colocadas na superfície do pavimento (em estacionamentos ou em qualquer área de pesagem), e complementadas com placas de nivelamento ou rampas, a fim de dispor de todas as rodas no mesmo nível e no mesmo plano durante a pesagem.

Os sistemas de pesagem estática sofrem com determinadas limitações, exigindo tempo e pessoal para a realização da pesagem, conforme descrito anteriormente. Com a utilização deste sistema de pesagem se torna difícil executar verificações precisas de carga em rodovias fortemente tráfegadas e autoestradas. Com um elevado volume de tráfego, e o aumento de veículos pesados nas estradas, os sistemas de pesagem estáticos se tornam ineficazes atuando com um efeito bastante limitado.

Devido ao longo período de tempo requerido para a pesagem estática, quando vários caminhões são selecionados para verificação, a área de pesagem fica saturada, assim, outros caminhões sobrecarregados tem a possibilidade de passar livremente pelo posto de pesagem. Além disso, a pesagem estática implica em atrasos de 10 a 30 minutos (por vezes mais), o que penaliza os demais motoristas, incluindo a maioria que está na legalidade.

Pelas razões descritas, e de modo a aumentar a eficiência das verificações, foi desenvolvido e implementado o conceito de pesagem em movimento, sistema este parcialmente automatizado.

São sistemas com média participação humana e, conseqüentemente, médios níveis de eficiência e eficácia na fiscalização.

Neste caso, a operação consiste no direcionamento de todos os veículos do fluxo a uma balança dinâmica de média/baixa velocidade, que automaticamente seleciona os veículos suspeitos de sobrecarga e, através de sinais de trânsito e painéis de mensagem variável, os direciona à pesagem em balança estática, ou dinâmica de baixa velocidade. Constatada a não conformidade, o veículo é retido até que seja emitida por um agente a notificação de multa, e, nos casos previstos, providenciado pelo transportador o descarregamento e remoção do excesso de carga.

Um software da aquisição de dados e sistema de processamento é concebido para analisar o sinal das células de carga, levando em conta a velocidade, para assim calcular com maior precisão as cargas por roda ou por eixo. Estes sistemas são instalados fora das pistas de tráfego, em áreas de pesagem, ou em postos de pedágio ou qualquer outra área controlada. A velocidade de funcionamento está geralmente entre 5 km/h e 15 km/h.

Dada a tendência de crescimento do fluxo de carga rodoviária, e considerando a premissa de que o fluxo de veículos conformes seja minimamente perturbado, a eficiência e efetividade do sistema vai depender diretamente do grau de automatização empregado na fiscalização, neste contexto sistemas automatizados como os de pesagem em alta velocidade (HS - WIM) merecem destaque especial.

São sistemas com baixa participação humana e, conseqüentemente, altos nível de eficiência e eficácia na fiscalização. Neste caso, a operação do sistema consiste em pesar automaticamente todos os veículos do fluxo, na velocidade normal de operação, por meio de balança dinâmica de alta velocidade, instalada no pavimento ou sob pontes.

Detectada a não conformidade, o veículo e seu condutor são automaticamente identificados, por meio de análise de imagens, e incluídos num cadastro informatizado de infratores, com vistas à emissão automática de penalidade.

Os sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (*Weigh-in-Motion* - WIM), se propõem justamente a funcionar como selecionadores dos potenciais infratores no segundo tipo descrito anteriormente. Ocorre que a pesagem de toda uma frota de caminhões é onerosa tanto em aspectos de tempo - que hoje custam cada vez mais ao custo agregado de transporte - mas também para os órgãos responsáveis pela fiscalização.

Contrariamente aos sistemas de pesagem em movimento que podem de uma maneira automática pesar os veículos e assim acusar os veículos com valores de carga por eixo ou total acima do limite, os postos de pesagem móvel por serem amostrais não conseguem muitas vezes coibir adequadamente esta prática abusiva de pesos no Brasil, já que se conhece uma série de artifícios utilizados pelo público transportador para evitar a fiscalização.

Já os postos fixos são bastante mais eficazes, mas, assim como os móveis, também requerem um desvio total dos veículos e filas acabam por se formar prejudicando a fluidez do tráfego.

Outra discussão importante, é o fato de que "os justos pagam pelos pecadores"; ou seja, transportadores que se enquadram dentro das prerrogativas legais, pagam pelo mesmo ônus de tempo e transtorno à pesagem pelo fato de ter que entrar na balança que via de regra representa um atraso.

É por este fato e outros que o WIM vem sendo hoje apontado com uma potencial solução para este problema. Uma série de vantagens podem ser apontadas para o WIM:

- Infraestrutura mais barata do que a implantação de postos de pesagem
- Operação automática sem necessidade de agentes de pesagem
- Monitoramento contínuo com possibilidade de 100% do fluxo de veículos pesados
- Velocidade operacional da via; não há necessidade de desvios, nem de redução da velocidade dos veículos.
- Classificação dos veículos de acordo com seu espectro de carga para avaliação dos pavimentos.
- Custo de operação globalmente reduzido
- Gratificação aos transportadores não infratores que não precisam ser onerados com os gastos de tempo nas balanças fixas ou móveis.

No esquema da Figura 6 são apresentados os sistemas de pesagem e as suas principais subdivisões dos sistemas apresentados anteriormente através de breves considerações sobre cada um dos grupos e subdivisões.

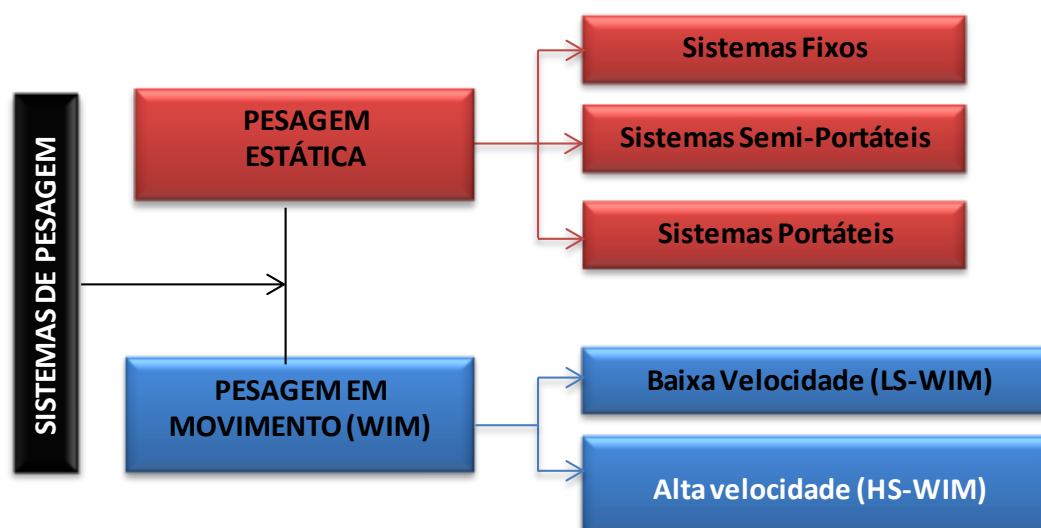


Figura 6 - Sistemas de pesagem de veículos: grupos e subdivisões de metodologias

De acordo com o descrito na introdução, a presente tese é parte integrante de dois estudos pioneiros realizados no RS com o estudo, calibração e implantação funcional de um sistema de pesagem em movimento HS-WIM na rodovia BR-290/RS intitulado como “Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM) ”.

Posteriormente, na continuidade da pesquisa realizada em parceria com a ANTT, a CONCEPA e a PRIME Engenharia e Consultoria, realizou-se uma análise da influência das cargas registradas na rodovia e a sua influência no desempenho do pavimento, nesta fase a pesquisa foi denominada “Uso da tecnologia de Weigh-in-Motion (WIM) para avaliação de desempenho de pavimentos asfálticos da BR 290/RS – Freeway” (Brito, 2015).

No item 2.3 “Sistemas de Pesagem em Movimento Weigh-in-Motion” será apresentada uma revisão mais detalhada sobre alguns princípios e funcionalidades dos sistemas WIM, em concordância com as pesquisas mencionadas. Já no decorrer da tese, na análise dos dados de tráfego e análises de desempenho das estruturas de pavimentos serão apresentados os dados gerados na realização das pesquisas WIM juntamente com os dados de monitoramento de desempenho dos trechos, avaliando a influência do real tráfego atuante na Rodovia BR-290/RS.

Após a breve revisão sobre os principais sistemas e mecanismos de fiscalização e pesagem de veículos de carga, no próximo item será apresentada a atual situação de fiscalização de cargas no país, trazendo um pouco sobre o histórico da fiscalização e sua importância além das demandas crescentes com o passar do tempo e evolução das tecnologias.

2.2.3 Atual situação de fiscalização de cargas no Brasil

Apesar de sua importância, o setor rodoviário apresenta carências históricas de investimentos, principalmente no que diz respeito à ampliação da malha rodoviária (apenas 12% pavimentada) e na conservação e manutenção das rodovias pavimentadas existentes que apresentam elevados percentuais em estado ruim ou péssimo de conservação, conforme apresentado anteriormente.

Aliadas à estas deficiências, que geram um gargalo enorme no transporte rodoviário brasileiro, as condições de fiscalização das cargas transportadas também é fundamental para a segurança e conservação das rodovias.

Em um contexto onde cada vez mais é observada uma degradação prematura dos revestimentos asfálticos em função principalmente dos elevados níveis de solicitações provocados pelo aumento do volume de tráfego pesado e circulação com excesso de cargas, têm-se a necessidade cada vez maior de atualizar o conhecimento sobre o espectro de cargas real que solicita os pavimentos, quantificando o excesso de carga e avaliar os efeitos destes fatores no desempenho dos pavimentos.

Entre os principais efeitos causados pela sobrecarga rodoviária podem ser citados a queda dos níveis de serventia prematura dos pavimentos em função do efeito danoso da sobrecarga aos pavimentos, e também o aumento do número de acidentes em virtude de condições irregulares de trafegabilidade dos veículos.

O tráfego de veículos de carga representa um papel muito importante no dimensionamento de estruturas de pavimentos, bem como a representação do seu comportamento ao longo do tempo. No decorrer das últimas décadas muitos estudos têm sido desenvolvidos com o interesse de representar de forma mais próxima à realidade as condições impostas pelo carregamento oriundo dos veículos e os seus reflexos nos pavimentos, para que os projetos e sua posterior análise possam ser desenvolvidos da maneira mais fiel possível à situação vivenciada em campo (FONTENELE, 2011).

O controle e a fiscalização das cargas transportadas pelas das nossas rodovias são fatores importantes para gerência da malha rodoviária e controle dos mecanismos de degradação dos pavimentos rodoviários, tanto em nível de rede quanto em nível de projeto. Atualmente observa-se ainda uma grande carência de informações sobre as reais cargas transportadas nas rodovias brasileiras, fator relacionado principalmente aos planos de operação dos postos de

pesagem que sabidamente não são suficientes para atender a demanda necessária para um correto controle de cargas e aplicação da legislação relacionada à fiscalização das sobrecargas.

Postos de pesagem inoperantes, restrições de operação apenas em horário comercial ou períodos bastante reduzidos, problemas de infraestrutura e rotas de fuga são alguns dos problemas atualmente enfrentados na fiscalização das cargas transportadas nas rodovias brasileiras.

Analisando o histórico de fiscalização de cargas rodoviárias no Brasil, na década de 60, a legislação brasileira passou a prever o controle de pesagem de veículos e, até 1974 o efetivo controle era efetuado com equipamentos de pesagem estática. Em 1975, o então DNER, por intermédio de sua Diretoria de Trânsito, iniciou o desenvolvimento do Plano Diretor de Pesagem, prevendo o emprego de equipamentos de pesagem dinâmica (de baixa velocidade).

Em outubro de 1979, na BR-277/PR, entrou em operação o primeiro Posto de Pesagem Fixo. Daí em diante outros postos foram implantados. A partir das décadas de 1990 e 2000 aquele Plano começou a mostrar-se inadequado em função das modificações constantes dos fluxos de cargas e das evoluções tecnológicas introduzidas na fabricação dos veículos de carga e nos equipamentos de pesagem e periféricos de controle.

O novo Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem apresentado em 2006 pela Coordenação Geral de Operações Rodoviárias/DIR/DNIT trazia as necessidades e a urgência de ampliação e manutenção dos Postos de Pesagens de Veículos (PPV).

Para minimizar a carência na área, o plano contava com a construção de 148 Postos Fixos de Pesagem de Veículos e 72 Praças para operações de equipamentos móveis. A solução imediata para enfrentar a situação é a implementação do Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem. Considerando o aspecto estratégico como condicionante fundamental, contemplando toda a malha rodoviária federal, e ainda levando em conta as interferências com as vias estaduais e municipais, objetiva estancar o processo de deterioração da malha rodoviária, coibindo todo o tráfego pesado, em desacordo com a legislação (principal causa do problema) (DNIT, 2006).

O Edital de Licitação previa um período de 05 (cinco) anos de contrato, para consolidação do Plano Diretor através de atividades de construção e manutenção de PPVs, reforma e manutenção de PPVs existentes e o fornecimento, instalação e manutenção dos equipamentos. A licitação foi regida pela Lei 8.666 de 21 de junho de 1993 e suas modificações posteriores.

A necessidade de manutenção e implantação de novos postos fixos e móveis de pesagens está apresentada de forma resumida na Tabela 3 a seguir. A distribuição dos postos é apresentada por região e as necessidades retratam um panorama das carências enfrentadas na área com um total de 102 novos postos fixos a ser construídos e 46 postos existentes com necessidades de reformas e readequações de infraestrutura. Somando a estas necessidades os postos móveis de fiscalização tem-se um total de 220 áreas de fiscalização.

Tabela 3 – Distribuição dos postos fixos e móveis de pesagens (DNIT, 2006)

Região	Postos Fixos		Postos Móveis	TOTAL
	A construir	A reformar		
Centro-Oeste	23	3	15	41
Nordeste	41	4	20	65
Norte	9	1	3	13
Sudeste	16	26	27	69
Sul	13	12	7	32
TOTAL	102	46	72	220

O relatório da Controladoria-Geral da União (CGU), através do Relatório de Avaliação da Execução de Programas de Governo N°17 – “Operação do sistema de pesagem de veículos” relata a ação 2325 vinculada ao Programa 0663 – “Segurança Pública nas Rodovias Federais”, (Brasil, 2013) cujo objetivo é evitar a deterioração precoce de rodovias federais causada pelo tráfego de veículos com excesso de peso através da verificação dos postos de pesagem de veículos – PPV, fixos ou móveis.

O custo envolvido na execução de contratos de pesagem atualmente firmados no DNIT é estimado em R\$80 milhões de acordo com o mesmo relatório. O esforço colocado na melhoria dos sistemas de pesagem, apesar de crescente, ainda não está a contento conforme relatado na avaliação da CGU. Diz ainda o documento que o objetivo pretendido com a operação dos postos de pesagem “não foi alcançado a contento”.

Mostrando o cenário de controle e fiscalização de cargas nas rodovias brasileiras, segundo dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT), em 2013 havia apenas 117 balanças em operação para mais de 60 mil quilômetros de rodovias federais, e sem controle de desvios. Na época destacava-se a importância da implementação rápida do Plano Nacional de Pesagens para dar mais eficiência às rodovias, através de um escoamento mais rápido da produção, e aliviar o gasto nas estradas federais, com maiores recursos para obras de manutenção e expansão da malha.

Através de informações disponibilizadas no site do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o mesmo vem implementando o Plano Nacional de Pesagem. Em sua primeira etapa, foram instaladas 73 novas balanças: 42 fixas, com operação 24 horas por dia, e 31 móveis, que operam 8 horas diárias. Outros 94 postos fixos e 67 móveis estão previstos para a segunda etapa do plano, mas a licitação foi suspensa pela Controladoria Geral da União.

O DNIT avalia que a primeira etapa do Plano Nacional de Pesagem foi positiva, apesar das falhas apontadas na operação pelas auditorias da CGU e do Tribunal de Contas da União. Segundo o departamento, foram justamente os prós e contras da primeira fase que permitiram desenvolver um novo conceito de fiscalização de peso, os PIAFs (Postos Integrados Automatizados de Fiscalização).

Segundo informações do Departamento, o sistema permitirá fiscalizar veículos em movimento, na velocidade de operação definida para o segmento a ser fiscalizado através de uma pesagem rápida na pré-seleção dos veículos de carga. Com isso, a frota de veículos de carga e ônibus, que hoje trafegam dentro do limite de peso permitido, não precisará reduzir a velocidade para ser fiscalizados. Somente veículos com sobrepeso serão dirigidos ao pátio de fiscalização.

A expectativa do DNIT é fiscalizar 100% da frota circulante nos corredores onde o novo modelo será implantado, permitindo concentrar esforços nos veículos que de fato apresentam algum tipo de problema. A expectativa é que os 35 primeiros PIAFs entrem em operação no início de 2017 e serão instalados em rodovias administradas pelo governo federal em 14 estados: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rondônia, Pará, Piauí, Maranhão, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Os postos devem ser instalados o mais próximo possível das regiões geradoras de carga para impedir que veículos trafeguem com excesso de peso e danifiquem o pavimento das rodovias. Além dos 35 postos licitados, outras 27 unidades já foram validadas e 64 potenciais locais foram identificados pelo DNIT. Este novo modelo de fiscalização (PIAFs) evita a perda de tempo dos caminhoneiros que trafegam com cargas dentro dos limites permitidos pela legislação e possibilita a operação sem a presença física do agente de trânsito. A tecnologia do sistema de pesagem em movimento instalada nas rodovias garante mais agilidade no controle do excesso de peso ao fiscalizar os veículos enquanto trafegam sem a necessidade de reduzir sua velocidade.

Além disso, os postos também diminuem o tempo de parada dos veículos nas balanças, pois, os agentes da Estação de Controle selecionam, previamente, os caminhões com indicativo de excesso de peso, de dimensões ou outras irregularidades que serão orientados por meio de painéis eletrônicos a reduzir a velocidade e passar pela balança de precisão no posto de fiscalização. O sistema contará, ainda, com unidade de Controle de Fuga em pista (Agência CNT Notícias, 2015).

Em pesquisa sobre os postos de pesagem em operação no país realizada durante a finalização da presente tese, e em contatos com os órgãos como Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) poucos dados foram obtidos.

De acordo com o DNIT, no ano de 2014, haviam 73 PPVs (Postos de Pesagem Veicular) em funcionamento no país, que foram construídos na década de 1970 e fazem o controle de pesagem manualmente por agentes de trânsito. Destes, 41 são fixos e 32 móveis.

Segundo informações obtidas no site da ANTT (2016) os pontos de pesagem e fiscalização em rodovias estão distribuídos segundo mapa apresentado na Figura 7. Observa-se a ocorrência de 21 Postos de Pesagem Veiculares (PPVs) conforme indicação do mapa, porém sem nenhuma informação de funcionamento, ou seja, se os PPVs estão em operação ou se os mesmos estão inoperantes. Estes PPVs estão localizados unicamente na região Sul e Sudeste do país.

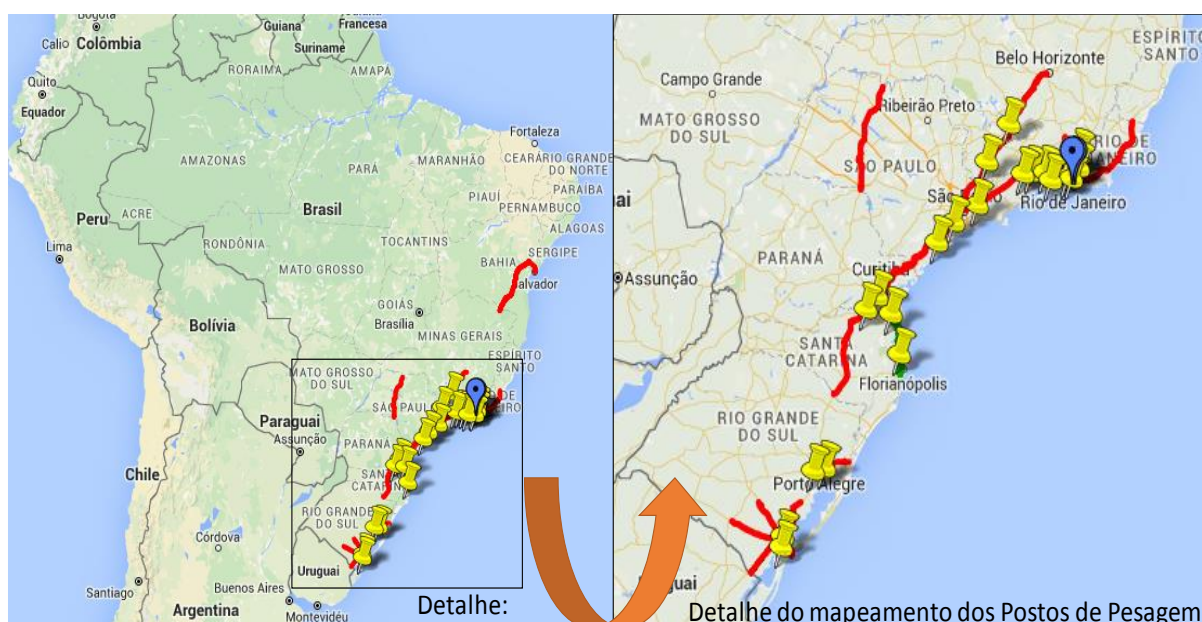


Figura 7 – Localização dos Postos de Pesagem de Veículos (Adaptado ANTT, 2016)

Em pesquisa de campo realizada através de visitas às rodovias e informações obtidas com a Polícia Rodoviária Federal (PRF), no estado do Rio Grande do Sul atualmente somente um PPV está em operação (dados: agosto 2016). Informações não oficiais relatam um panorama idêntico na grande maioria dos estados brasileiros.

Sabe-se que parte da evolução necessária no desenvolvimento dos postos de pesagem poderá vir com o aumento dos sistemas automatizados. Neste contexto, o uso do WIM como balança seletiva poderá facilitar enormemente a operação das pesagens que poderá apontar os possíveis veículos sobrecarregados e restringir a entrada de veículos nos PPVs.

Ademais, com o uso de sistemas e monitoramento constante, estima-se que o nível de observância dos limites legais aumente, já que com um sistema eficiente de controle, que seja atuante 24 horas, 7 dias na semana, só terá a elevar a tendência ao comprometimento dos transportadores com os limites legais devido às possíveis sanções que sofrerão.

2.2.4 Síntese: Importância do tráfego na vida útil do pavimento

Em síntese ao presente item 2.2, no qual se fez uma abordagem do transporte rodoviário de cargas, trazendo itens relevantes sobre legislação nacional para fiscalização e controle de cargas, sistemas de fiscalização e atual situação no país no que diz respeito ao controle de cargas, faz-se um breve resumo da importância da quantificação do tráfego para projeto e análise de vida útil de pavimentos flexíveis.

Em todos os países que participam de forma significativa do comércio mundial, tem-se observado um aumento da quantidade de carga transportada pelo modal rodoviário, bem como da carga média transportada por veículo.

Na Figura 8 é apresentado um panorama de crescimento dos veículos comerciais na frota nacional de 2003 a 2014. Observa-se um crescimento praticamente exponencial da frota com um aumento médio de 4,8% a.a. o que representa cerca de 690 mil caminhões a mais em 10 anos (Sindipeças 2015).

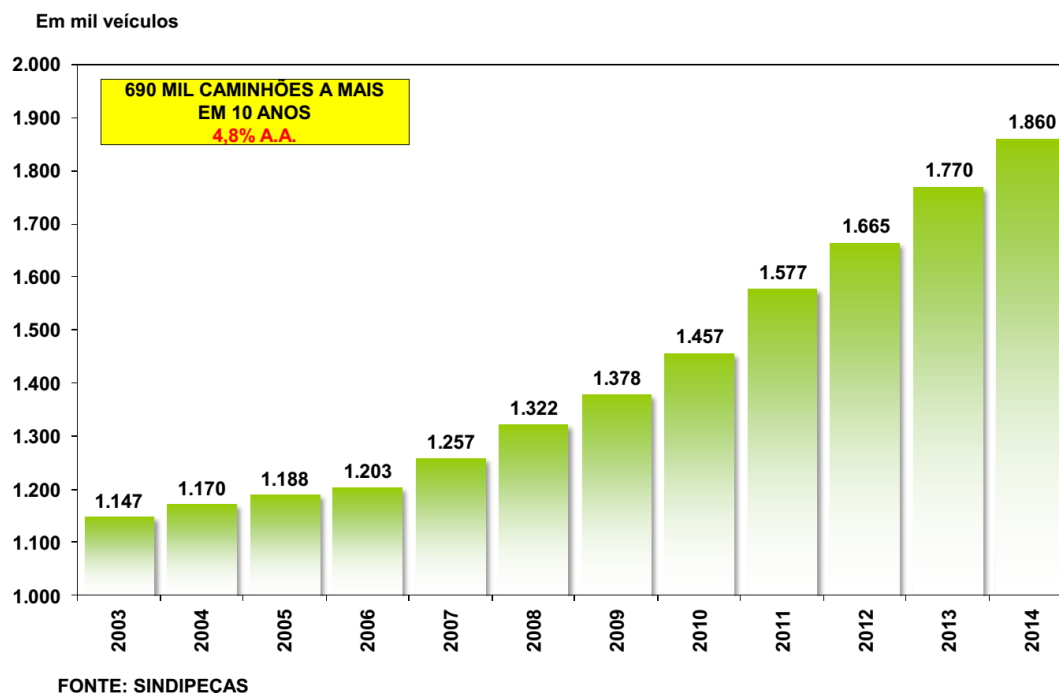


Figura 8 – Crescimento da frota de caminhões entre os anos de 2003 e 2014

O crescimento continuado do comércio, e do congestionamento de tráfego, torna difícil para a indústria realizar economicamente suas trocas físicas, sem usar cargas cada vez maiores e mais pesadas. No Brasil, que apresenta em sua matriz de transportes uma predominância histórica de transporte de cargas através do modal rodoviário, este cenário tem provocado um aumento na degradação dos pavimentos, uma degradação prematura que vem se agravando nas últimas décadas.

Os dados e informações dos excessos de carga praticados ainda são muito escassos. Além da quantidade insuficiente de postos de pesagem, verifica-se ainda uma carência de investimento em equipamentos para a coleta de dados ao longo das rodovias, mesmo que para efeitos únicos de pesquisa e não de fiscalização/punição, ou seja, fora dos postos de pesagem obrigatórios.

Não só a questão relacionada à quantidade de postos em operação tem que ser observada, mas também deve ser levado em consideração a adequada localização desses postos e seus horários de funcionamento. Muitos postos têm seus dados comprometidos pela existência da possibilidade (e utilização) de rotas de fuga, além dos horários de operação, geralmente durante horário comercial, fator que favorece o transporte com excesso de carga nos horários sem fiscalização nas rodovias.

No trabalho desenvolvido pelo DNIT *et al.*, (2007) são indicadas como as causas da limitação da efetividade das estações de pesagem, as questões relativas à facilidade com que os postos fixos de pesagem são contornados, à falta de recursos para a fiscalização (custos de instalação e operação) e à limitação de horários de funcionamento e rotas monitoradas. Segundo relatório, dessa forma, em virtude das limitações reportadas, veículos sobrecarregados trafegam pela maioria das rodovias sem serem punidos pelo dano que causam na operação da via e ao pavimento.

Em função das dificuldades relatadas que impedem uma fiscalização efetiva, o desconhecimento das cargas excedentes afeta não somente o cumprimento da lei como também a precisão dos fatores de carga dos veículos e, conseqüentemente, a equivalência de carga por eixo padrão, item ainda empregado e importante ao dimensionamento de pavimentos.

Fernandes Júnior (1994) comentou em seu trabalho que um dos primeiros estudos relativos à pesagem de veículos de cargas no Brasil foi realizado entre 1976 e 1981 pelo GEIPOT (Grupo de Estudos para Integração da Política de Transportes), onde ficou evidenciado que, naquela época, os caminhões trafegavam com cargas de 10 a 30% acima dos limites.

Um exemplo que retrata uma condição extrema quanto ao excesso de cargas transportadas está descrito em um estudo realizado no estado da Bahia por Martins e Serravalle (2007), nas rodovias federais e estaduais delegadas ao DER-BA, onde foi constatado que 85% dos veículos estavam com excesso de peso por eixo e os veículos com maior frequência de infrações eram os do tipo 2C, 3C e 3S3.

Tal estudo foi anterior à entrada em vigor da Resolução nº 258/2007 que permitiu a multa por excesso de carga nos eixos, estabelecendo uma “tolerância” de 5%. Este limite, porém, é estabelecido em função da precisão do equipamento de medição (2%), não servindo como um adicional de carga para o transportador, contudo, na realidade acaba sendo utilizado de forma a permitir uma maior quantidade de carga transportada.

Posteriormente a Resolução nº 258/2007 permitiu a multa por excesso de carga nos eixos, elevando o percentual para 7,5% por eixo em caráter temporário até 31 de dezembro de 2013. Recentemente, contrariando as expectativas do meio técnico e acadêmico, foi aprovada a nova Resolução do CONTRAN, nº 489/2014, ampliando o limite de tolerância nos eixos dos caminhões de 7,5% para 10%.

Este aumento da tolerância é fruto de reivindicações dos transportadores e já vinha sendo debatida há alguns anos..

Neste contexto de tolerâncias de cargas transportadas e tráfego com excesso de cargas, ao contrário do que é anunciado e defendido por algumas classes, o aumento da tolerância por eixo afeta sim a vida útil dos pavimentos, e de forma muito significativa. Na engenharia rodoviária, a vida útil de um pavimento é calculada através do número de repetições de carga equivalente a um ESRD de 8,2t tomado como padrão.

Neste caso, para uma mesma carga, quanto menor o número de eixos do veículo, maior o valor equivalente em número de solicitações do eixo padrão, devido à maior concentração da carga. Por essa razão, embora existam limites de peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC), além dos limites relacionados à capacidade máxima de tração do veículo (CMT), o que efetivamente contribui para a degradação do pavimento é o excesso de peso por eixo.

De acordo com o estabelecido no *AASHO Road Test* e reforçado por Chou (1996), a degradação do pavimento aumenta exponencialmente com a carga por eixo. Esse expoente varia entre 3 e 6, de acordo com o tipo e estrutura do pavimento. Para efeitos práticos e didáticos, aceita-se, internacionalmente, como um valor médio aplicável à relação entre excesso de peso e degradação do pavimento, um expoente igual a 4, o que determina o que é conhecido como a Lei da Quarta Potência.

Nessas condições, um eixo de carga duas vezes mais carregado que outro causará 16 vezes mais danos ao mesmo pavimento. Para melhor exemplificar o efeito da sobrecarga no pavimento, Widmer (2002) afirma que o aumento de carga de 20% acima dos limites atuais implicará na redução da vida útil da estrutura em 50% e Albano (2004) ressaltou que os 2,5% a mais na tolerância sobre a carga por eixo estabelecida desde a Resolução 104/99 do CONTRAN, é responsável por uma redução de 10 a 15% na vida prevista do pavimento.

Com base na Lei da Quarta Potência, tomando como exemplo um pavimento projetado para uma vida útil de 15 anos, com sobrecargas de 5%, 7,5% e 10% terá sua vida útil reduzida significativamente, conforme apresentado na Figura 5 do item 2.2.1, onde foi apresentada um aumento significativo do dano relativo causado ao pavimento com o aumento dos percentuais de sobrecarga (Brito *et al.*, 2013).

No caso apresentado, para um aumento de 5% na carga por eixo observou-se um dano relativo de 20% à estrutura, reduzindo a vida útil em até 3 anos. Com aumentos nas sobrecargas da ordem de 7,5% e 10% o nível de dano relativo provocado foi de 26,7% e 35,0%, respectivamente, o que leva a uma estimativa de redução na vida útil da estrutura de 4 e 5,3 anos (em um período de projeto de 15 anos).

Tecnicamente estes valores podem ser contestados com a alegação de que na realidade da rodovia, a forma de consideração das cargas nos eixos ou grupos de eixos em seus limites extremos (totalmente carregados) não ocorre de forma predominante, sempre haverá, dentro da frota solicitante, aqueles veículos com cargas menores do que a sua capacidade máxima e os veículos vazios. Surgindo desta forma, uma espécie de compensação dos veículos sobrecarregados com os veículos com cargas menores ou vazios. Porém, na realidade isso acaba não acontecendo.

Para verificar como que ocorre esta variação na realidade, a pesquisa WIM realizada na BR-290/RS, já mencionada anteriormente apresentou um comparativo entre os diferentes cenários de cargas, considerando um cenário Ideal e um cenário Real.

No cenário Ideal (Cenário A) foram considerados carregamentos máximos nos eixos, conforme é realizado na grande maioria dos casos para determinação do número de solicitações de eixo padrão (N). Já para o cenário Real (Cenário B), considerando as condições reais da frota de veículos que solicitam o pavimento da rodovia, foram considerados o percentual de veículos sem sobrecarga dentro da frota analisada (87%) com os carregamentos médios nos eixos ou grupos de eixos (B1) e o percentual com excesso de cargas (13%) também com as cargas médias observadas neste contexto (B2).

Estes dados estão apresentados a seguir na Figura 9, juntamente com as estimativas de número N (USACE) para cada um dos cenários descritos.

Analisando os valores nota-se que apesar de corresponder apenas a 13% do total de veículos, o Cenário B2 ($N_{USACE}=2,24E+08$) no qual são considerados os veículos sobrecarregados, praticamente se iguala ao Cenário A, tido como Ideal ($N_{USACE}=2,77E+08$) (Figura 10).

Ou seja, a influência da frota sobrecarregada é muito grande sobre a vida útil do pavimento, fato este que será quantificado de forma mais detalhada nas próximas etapas da presente pesquisa através das análises de desempenho realizadas.

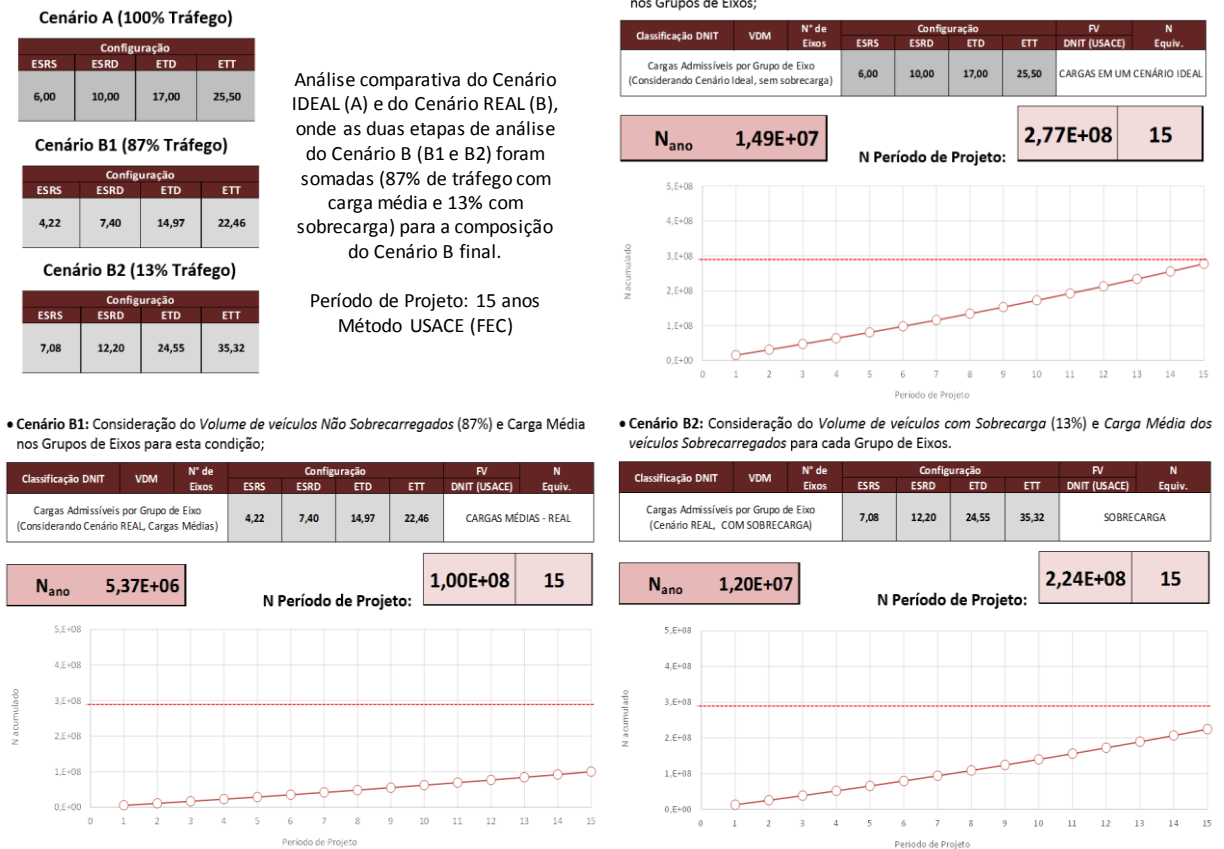


Figura 9 – Definição de solicitações de eixo padrão rodoviário para os cenários de cargas analisados: Cenário A (Ideal: com carregamentos máximos nos eixos ou grupos de eixos) e Cenário B (Real: B1 – 87% da frota sem sobrecarga e B2 – 13% da frota sobrecarregada)

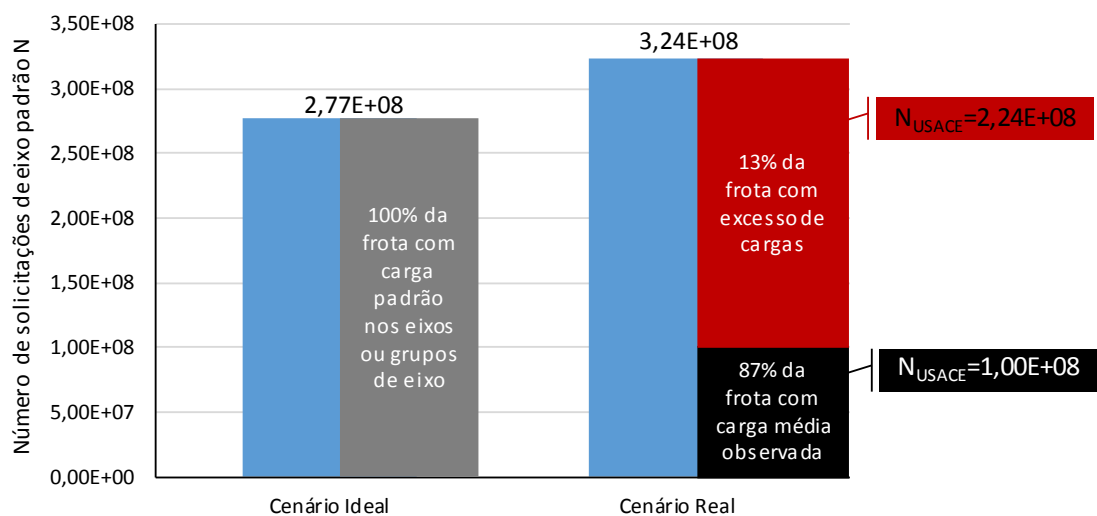


Figura 10 – Comparativo entre os cenários analisados: detalhe para a significativa influência dos 13% de veículos sobrecarregados na magnitude das solicitações de eixo padrão (N)

A Figura 11 representa o comparativo entre os dois cenários, Ideal e Real, através do número de solicitações de eixo padrão rodoviário. O excesso de carga presente cenário Real tem uma influência significativa na quantificação da estimativa de solicitações de tráfego, fato este que levará a uma diminuição significativa na vida útil do pavimento, uma redução de aproximadamente 2 anos em relação ao cenário Ideal.

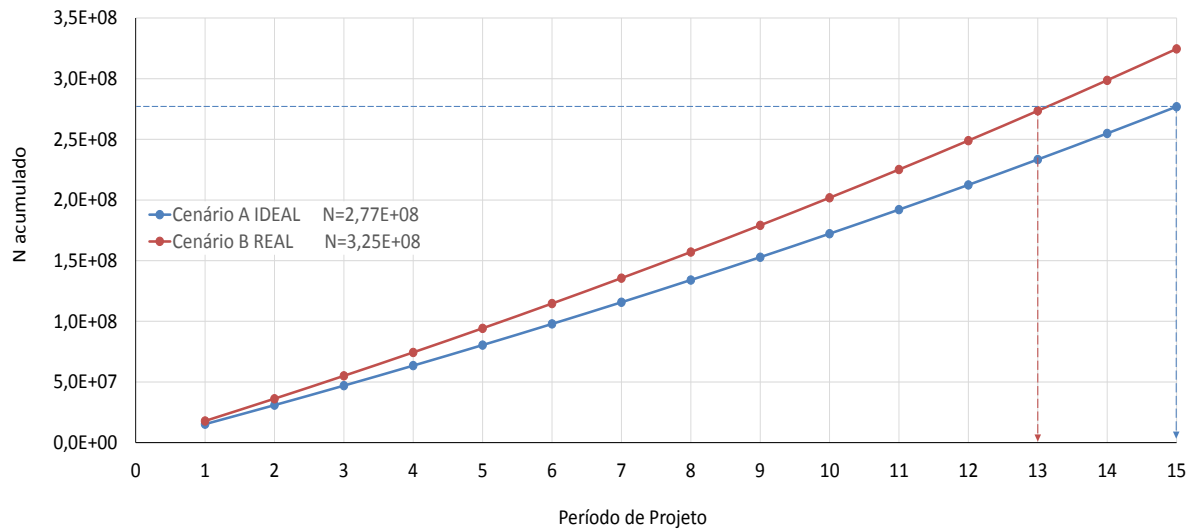


Figura 11 – Comparativo entre os cenários analisados (cenário Ideal e cenário Real): influência dos veículos sobrecarregados no aumento da estimativa de tráfego solicitante (número N) e redução da vida útil do pavimento

Como conclusão, podemos observar que o aumento dos carregamentos nos eixos, mesmo dentro dos ditos “limites de tolerância” afeta de forma significativa a vida útil dos pavimentos rodoviários. Além disso, observou-se através da pesquisa WIM, desenvolvida em parceria com esta tese, que a influência da frota sobrecarregada, mesmo apresentado percentuais de ocorrência relativamente baixos dentro do tráfego total analisado (13%) traz malefícios consideráveis à vida útil do pavimento.

Isso ocorre em função dos percentuais de excessos praticados dentro deste contexto de veículos sobrecarregados, o que é sintetizado na Figura 12 onde Pinto e Preussler (2002) retratam a redução da vida útil de um pavimento rodoviário em função dos percentuais de sobrecargas praticados.

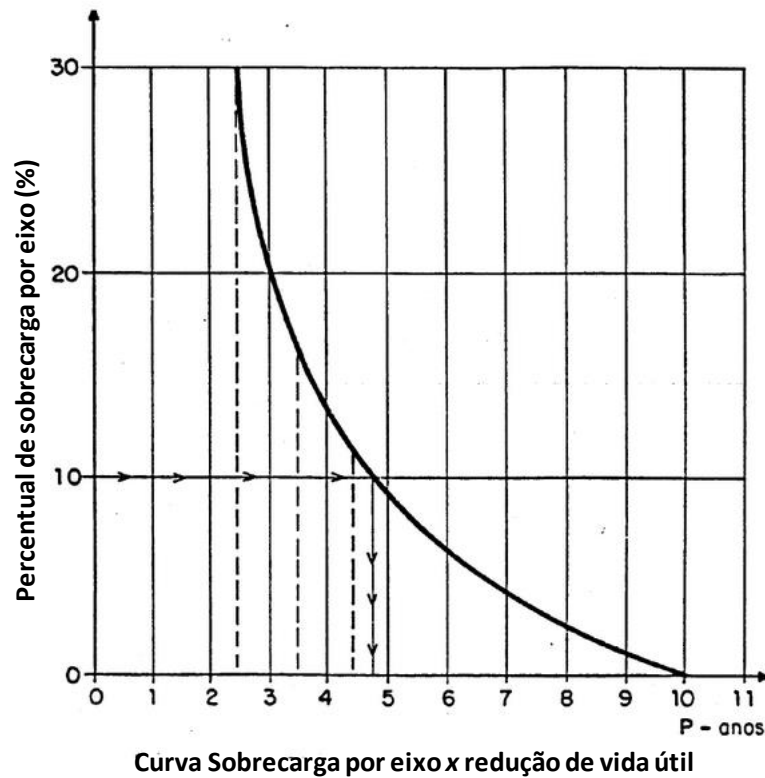


Figura 12 – Redução da vida útil em função dos percentuais de sobrecargas por eixo

Fonte: Pinto e Preussler (2002)

Estudos desenvolvidos no LASTRAN (Laboratório de Sistemas de Transportes da UFRGS), demonstram que a inexistência de fiscalização do excesso de peso aumenta em 33% seus custos de manutenção. Com relação a recapeamentos necessários para manutenção do pavimento em condições plenas de trafegabilidade, estudos baseados no programa HDM 4.3, do Banco Mundial, indicam que, para um horizonte de 20 anos, em vias sem controle de peso são requeridos três recapeamentos completos, ao passo que, nas vias dotadas de controle de peso, apenas dois recapeamentos seriam necessários.

Estes dados demonstram o quanto a magnitude do tráfego afeta o desempenho do pavimento e favorece o surgimento precoce de diversos mecanismos de degradação. No item a seguir são apresentados resumidamente os principais sistemas de pesagem em movimento, e uma breve análise sobre a utilização destes sistemas no Brasil e no mundo, abordando o estado da arte e o estado da prática referente a utilização destes sistemas de fiscalização.

2.3 SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO – WEIGH-IN-MOTION

Os sistemas de pesagem em movimento, ou sistemas WIM (Weigh-in-Motion), são capazes de estimar o peso total de um veículo e que parte desse peso é suportada (e, conseqüentemente, transmitida ao pavimento) por cada eixo ou grupo de eixos do veículo. Os sistemas de pesagem em movimento podem ser utilizados para pesagem à baixas velocidades (*Low Speed - WIM*) ou na velocidade diretriz da via (*High Speed - WIM*) e para tanto utilizam diversas tecnologias compatíveis com suas funções.

Do ponto de vista dos sistemas de controle para pesagem com a utilização de equipamentos para pesagem em movimento, identificam-se como característica comum, os sensores, dos mais variados tipos, que devem ser instalados sobre a superfície da rodovia, abaixo da superfície da rodovia, inclui-se aqui também as obras de arte, ou ainda embutidos no pavimento. Além destes, existem também os sensores que são colocados fora da rodovia, ou ainda nos “chassis” de veículos, que de alguma forma, também possuem propriedades de prover estimativas de carga de veículos comerciais.

Os sistemas de pesagem em movimento estão em funcionamento desde a década de 1980 e são hoje amplamente utilizados em todo o mundo. A pesquisa relativa aos sistemas WIM tem tido foco no desenvolvimento de melhores métodos de calibração, novos procedimentos, para aumento da velocidade de pesagem e novas tecnologias, em especial no que diz respeito aos sensores.

Torna-se necessária e de grande importância para o entendimento das tecnologias aplicadas na presente pesquisa fazer uma distinção entre os sistemas de pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM) e de alta velocidade (HS-WIM), sendo este último o sistema utilizado para atingir os objetivos propostos na pesquisa realizada na BR-290/RS-Freeway para determinação do espectro de cargas circulante e posteriormente a sua influência no desempenho do pavimento.

Sistemas LS-WIM já são empregados largamente no controle da prática do excesso de cargas no transporte comercial rodoviário, seu uso no Brasil nesse controle não é novo, já em 1975 essa tecnologia foi selecionada para aplicação pelo Governo, no âmbito de um Plano Diretor de Pesagem.

Assim, em 1978 o primeiro de uma rede de postos de pesagem de veículos começou a operar, usando um sistema WIM do tipo *bending plate* para pré-seleção a 60 km/h, e um sistema WIM do tipo *load cell* para a fiscalização a 10 km/h.

A pesagem em movimento de veículos em alta velocidade (HS-WIM) vem se tornando um grande potencial, pois, permitem a fiscalização dos veículos diretamente no tráfego normal da rodovia com as velocidades praticadas e sem obrigar manobras de frenagem e aceleração.

Além do custo de implantação deste sistema ser relativamente baixo, quando comparado com os postos de pesagem existentes (postos fixos), além de aumentar a capacidade operacional dos postos de pesagem são frequentemente utilizados quando o tráfego intenso de caminhões não pode ser acomodado de outra maneira a não ser pelo artifício da pesagem em movimento.

Dada a tendência de crescimento do fluxo de carga rodoviária, e considerando a premissa de que o fluxo de veículos que trafegam dentro dos limites legais seja minimamente perturbado, a eficiência e efetividade do sistema vai depender diretamente do grau de automatização empregado na fiscalização, neste contexto sistemas automatizados como os de pesagem em alta velocidade (HS - WIM) merecem destaque especial.

Trata-se de um sistema com baixa participação humana e, conseqüentemente, alto nível de eficiência e eficácia na fiscalização. Neste caso, a operação do sistema consiste em pesar automaticamente todos os veículos do fluxo, na velocidade normal de operação, por meio de balança dinâmica de alta velocidade (sensores instalados no pavimento ou sob pontes).

Os sistemas de pesagem HS-WIM são constituídos de uma série de sensores, instalados em uma ou mais faixas de tráfego, adquirem valores como volume de tráfego e horários de ocorrência, velocidade, classificação do veículo baseada no número e no espaçamento de eixos, cargas por eixo ou total do veículo enquanto estes estão viajando na velocidade normal no fluxo de tráfego.

Sistemas HS-WIM permitem que todo tráfego que passam pela seção instrumentada seja monitorado, sem perturbação do fluxo de veículos na rodovia. Após detectada a não conformidade com os limites legais exigidos, o veículo infrator é automaticamente identificado, por meio de análise de dados adquiridos pelo sistema pesagem e imagens, sendo então desviados do tráfego para conferência e atuação.

Dependendo da magnitude do excesso de carga, no próximo posto de polícia/pedágio, identificado por imagem como integrante do cadastro de infratores, o veículo é sinalizado para fora do fluxo, e, nos casos previstos, retido até que o descarregamento e remoção do excesso de carga seja providenciado pelo transportador. Em sistemas completamente automatizados, os infratores são imediatamente identificados e incluídos num cadastro informatizado com vistas à emissão automática de penalidade.

No Brasil, assim como nos principais países desenvolvidos, os sistemas de pesagem WIM são um enorme potencial, pois, permitem a fiscalização dos veículos diretamente no fluxo normal do tráfego da rodovia com as velocidades praticadas e sem necessitar de manobras de frenagem e aceleração, além do custo de implantação de um sistema ser relativamente baixo, quando comparado com os postos de pesagem existentes. Na Figura 13 é apresentado um interessante comparativo entre os sistemas de pesagens convencionais e o WIM.

Como pode ser observado na imagem, uma das principais vantagens dos sistemas de pesagem dinâmica de alta velocidade é a baixa perturbação do tráfego circulante. A pesagem na velocidade operacional da via permite um constante monitoramento do tráfego viabilizando futuramente uma completa investigação dos eixos de cargas dos veículos que trafegam na rodovia (100% dos veículos) além de proporcionar economia do custo de transportes, evitando longas filas para pesagem como ocorre no caso de balanças fixas.



Figura 13 – Comparativo entre sistemas convencionais de pesagem (fixos) e sistemas de pesagem dinâmica (Weigh-in-Motion HS-WIM)

Segundo Jacob (2002) as tecnologias HS-WIM podem ser usadas principalmente na engenharia de Pontes e Pavimentos, isto é, para obter os padrões de tráfego de carga que são utilizados

como: (i) dados de projeto e para calibração de modelos; (ii) monitoramento de infraestrutura e avaliação de fadiga ou de cargas extremas; (iii) inspeção e estratégias de reforço e manutenção.

Proporcionam aos projetistas de rodovias um completo banco de dados sobre hora/volume de tráfego, velocidade, classificação do veículo baseado no número e no espaçamento de eixos, e o equivalente “*Equivalent Standard Axle Load*” (ESAL).

Mudanças nas tendências de tráfego podem ter impacto significativo na duração útil planejada das infraestruturas. É importante usar os melhores dados disponíveis localmente no projeto de pavimentos, uma vez que tais dados são específicos do local e mudam no tempo. Pode-se obter com a utilização deste sistema um completo monitoramento das tendências de tráfego; monitoramento de mudanças significativas nos limites admitidos de veículos pesados em categorias de peso específicas; monitoramento do aumento do uso de certas rotas; e desenvolvimento de fatores apropriados de pista e distribucionais para instalações com várias pistas.

A grande tendência de utilização dos sistemas HS-WIM, no momento atual em nosso país, está na triagem de veículos sobrecarregados antes de uma área equipada com verificação estática ou por dispositivos LS - WIM; uma pré-seleção com precisão no fluxo de tráfego aumenta amplamente a eficiência do controle e evita parar veículos legalmente carregados ou vazios.

Considera-se que existe uma hierarquia de aplicações da tecnologia WIM, de complexidade crescente, com pelo menos três níveis:

- **Nível 1:** coleta contínua de dados de peso da população de veículos, para dar suporte estatístico a estudos nas áreas de planejamento e projeto, entre outros;
- **Nível 2:** pré-seleção dos veículos com maior probabilidade de estarem sobrecarregados, para aumentar o foco da fiscalização, e identificação de fatores sistemáticos da prática de sobrepeso, para possibilitar ações preventivas, de solução de problemas;
- **Nível 3:** fiscalização direta, aumentando enormemente o percentual do fluxo de veículos monitorado (chegando até a 100% dos veículos), o percentual de veículos sobrecarregados detectados e o número de veículos sobrecarregados multados.

A estes níveis, correspondem requisitos de acurácia e confiabilidade também crescentes, que, no entanto, dependem fortemente do micro perfil do pavimento aonde está instalado o sistema (e da dinâmica dos veículos).

Neste contexto, a metodologia MS-WIM (ainda em desenvolvimento), usando múltiplos sensores, é a que tem mais chance de permitir, em futuro próximo, que se controle estes indicadores de qualidade do sistema de medida, variando-se, em função das condições do pavimento, a tecnologia e/ou o número e/ou o layout dos sensores de peso usados.

Apesar de suas grandes vantagens de utilização descritas anteriormente, os sistemas HS-WIM têm algumas limitações. A questão principal está relacionada com a precisão. A pesagem de veículos em movimento visa obter um valor estático (o peso do veículo) com o veículo em condição dinâmica.

Diversos fatores influenciam nessa medição, sendo os principais:

- Carregamento do veículo;
- A forma do sinal a ser processado;
- A suspensão do veículo, devido à interação dinâmica entre o veículo e a rodovia;
- A configuração do veículo (número de semirreboque, número de eixos);
- Uniformidade da superfície do revestimento e das características do pavimento;
- A velocidade de passagem.

Além disso, como os sensores são expostos ao completo volume de cargas de tráfego e estão montados na superfície do pavimento, eles podem ter um ciclo de vida limitado. Outra questão complicada é a calibração e avaliação de precisão do HS-WIM (Jacob *et al.* 2000, ASTM 2002).

Todos estes fatores mencionados entram como uma variável no sistema e se o mesmo não está corretamente calibrado o nível de precisão é significativamente afetado, gerando resultados não coerentes com a realidade.

A calibração garante que o peso estático estimado pelo sistema WIM se aproxime do peso estático real. A calibração é responsável por levar em conta os efeitos e características específicas daquela instalação tais como temperatura do pavimento, velocidades dos veículos e condições do pavimento. Os procedimentos de calibração podem incluir uma fase do teste de aceitação e uma fase de recalibração.

2.3.1 Principais sistemas disponíveis no mercado

Conforme descrito anteriormente, os sistemas de pesagem em movimento podem ser utilizados para pesagem em movimento a baixa velocidade ou a velocidade diretriz da via e para tanto utilizam diversas tecnologias compatíveis com suas funções.

As tecnologias de sensores mais utilizadas por sistemas WIM são: sensor de fibra ótica, tubo pneumático, laços indutivos (ILD), cabos piezelétricos, sensores magnéticos e sensores WIM (tais como piezelétrico, “*bending plate*”, célula de carga - *load cell* – e tapete capacitivo – “*capacitance mat*”), os quais serão abordados a seguir mais detalhadamente.

A seguir são apresentadas as principais tecnologias com o enfoque de uso do sistema na medição de carga dinâmica e estimativas de carga estática em rodovias.

I. Sistema WIM *Bending Plate*

Sistemas WIM “*Bending Plate*” podem ser usados para coletar dados de tráfego e para controle de excesso de carga. Os mesmos utilizam placas com sensores de pressão no lado inferior. O sistema grava o esforço medido pelos sensores de pressão e calcula a carga dinâmica na medida em que o veículo passa sobre o “*Bending Plate*”. A carga estática é estimada usando a carga dinâmica medida e os parâmetros de calibração, sendo que os parâmetros de calibração consideram fatores, tais como, velocidade do veículo, tipo de pavimento, dinâmica da suspensão dos veículos, parâmetros esses que influenciam as estimativas de peso estático.

A acurácia dos sistemas WIM “*Bending Plate*” pode ser expressa em função da velocidade de passagem do veículo por sobre as placas, assumindo que o sistema é instalado numa estrutura isolada do resto da rodovia e sujeito as condições normais de tráfego. A acurácia desses sistemas é maior do que a dos sistemas piezelétricos convencionais e seus custos são menores do que os dos sistemas com células de carga, entretanto os sistemas WIM “*Bending Plate*” não são tão precisos quanto os sistemas “*Load Cell*” e são consideravelmente mais caros do que os sistemas piezelétricos.

II. Sistemas WIM com sensores piezelétricos

Os Sistemas WIM piezelétricos são compostos por um ou mais sensores piezelétricos, laços indutivos e sistemas de aquisição e tratamento de sinais. Os sistemas piezelétricos detectam uma variação na tensão causada pela pressão exercida no sensor pelo eixo e por meio disso

mede a força de impacto que pode ser transformada em peso do eixo. Quando um veículo passa sobre o sensor piezométrico, o sistema registra a saída de tensão do sensor e calcula a carga dinâmica.

Os materiais utilizados nos sistemas WIM piezométricos são de quartzo, cerâmica e polímero e podem ser usados em intervalos maiores de velocidade que variam de 20 a 120 km/hora, dependendo do fabricante e da tecnologia empregada. Os sistemas WIM piezométricos podem ser utilizados para monitorar várias pistas simultaneamente, sendo sua vida útil de 3 a 5 anos.

III. Sistema WIM com fibra ótica

Existem muitos tipos de sistemas que baseiam seus princípios funcionais em ótica. Os mais comuns são: sistema WIM baseado no interferômetro de Michelson, sistema WIM baseado em polarimetria com uso de fibra ótica e sistemas WIM baseados em sensores do tipo “*microbend*” óticos.

Estes sistemas apresentam ótima resistência à interferência eletromagnética. Sua aplicação é especialmente considerada promissora em situações que requeiram um número maior de sensores, entretanto como ainda não é uma tecnologia consolidada, serão necessárias extensivas aplicações em campo visando demonstrar sua durabilidade, confiabilidade e seu desempenho operacional. Porém, um fato promissor apontado em experimentos com protótipos é a capacidade de alcançar elevadíssimos graus de acurácia.

IV. Sistemas WIM com célula de carga

Um típico sistema WIM com célula de carga é composto de uma única célula de carga, no mínimo um laço indutivo e um sensor de eixo. A célula de carga possui duas balanças em linha que operam independentemente. Sensores colocados fora das balanças são integrados de forma a garantir que não seja pesado nada que está fora das superfícies destinadas à pesagem.

Uma célula de carga possui barras de torções dentro da estrutura do sistema WIM de forma a transmitir todas as forças para a célula de carga. Esta célula de carga possui uma pequena porção de fluido que aciona um transdutor de pressão que por sua vez passa os dados para o equipamento de análise de dados, usualmente colocado na lateral da rodovia.

Os sistemas WIM com célula de carga são duráveis e estão entre os mais acurados sistemas WIM, podendo ser utilizado tanto para coleta de dados de tráfego como para controle de excesso peso, entretanto é o que necessita de maior investimento inicial e maior custo de manutenção. Além disso, o tempo de vida útil de um sistema WIM com célula de carga é de no máximo 5 anos.

V. *Sistema WIM com tapete capacitivo*

O tapete capacitivo consiste de um sanduíche de lâminas de aço e de material dielétrico. Numa configuração uma lâmina de aço inoxidável é envolta pelo material dielétrico poliuretano em cada lado. As superfícies mais externas das camadas de poliuretano são fechadas por outras lâminas de aço inoxidável. Uma tensão alternada é aplicada através do sanduíche de materiais.

Quando um veículo passa sobre o tapete capacitivo, o espaçamento entre as placas diminui fazendo com que aumente a capacitância. Isto altera a frequência de ressonância do circuito elétrico do qual faz parte o tapete capacitivo. A frequência de ressonância, medida pelo equipamento de gravação e de análise de dados é então demonstrada ser proporcional ao peso do eixo. Sensores de tapete capacitivo podem ser usados em aplicações WIM portáteis bem como permanentes. Não são tão acurados para estimar peso quanto outros sistemas WIM e estão entre os sistemas WIM mais caros disponíveis.

VI. *Sistema de Pesagem em Movimento com Múltiplos Sensores – MS-WIM*

O Equipamento ou tecnologia com múltiplos sensores, usualmente referidas como MS WIM (“*Multi-Sensors*” WIM), se caracteriza pelo uso de diversos sensores e técnicas adequadas de processamento e de correlação para aferir ou executar o processo de “pesagem” em movimento.

Sistemas de Múltiplos Sensores WIM independem da tecnologia utilizada pelos sensores, podendo inclusive utilizar sensores de tecnologias diferentes dentro de uma mesma configuração.

O emprego de múltiplos sensores WIM visa obter melhoria da acurácia, diminuir a dependência ao tipo de pavimento (isto é, impor menos restrições à “qualidade” do pavimento em que será utilizado o equipamento), diminuir a dependência ao tipo de veículo a ser “pesado”, aí incluídos os tipos de eixo e os tipos de suspensão, etc., diminuir a dependência ao “como” o veículo está sendo dirigido (fator humano), i.e., aos efeitos da frenagem, aceleração, velocidades, etc.

Desta forma, quatro vantagens da utilização de múltiplos sensores podem ser ressaltadas:

- Redução da dependência dos tipos e características do pavimento;
- Redução da dependência dos tipos e características dos sensores;
- Ampliação do uso de mesmos sistemas para diversas finalidades; e
- Facilitação nos processos de calibração e aferição.

A principal desvantagem do sistema MS WIM é ainda a sua pouca utilização prática e a necessidade de ter-se que ajustar e consolidar algoritmos eficazes para o processamento e tratamento dos dados bem como se adequar a forma de se realizar a calibração para diferentes condições infraestrutura e operação de pavimentos.

2.3.2 Precisão dos sistemas e fatores de erros internos e externos

A precisão dos sistemas WIM é função de quatro principais fatores:

- Dinâmica do veículo;
- Integridade, composição e projeto do pavimento;
- Variância inerente no sistema WIM; e
- Calibração.

A dinâmica do veículo é dependente da rugosidade e da irregularidade da superfície da rodovia, tipo de suspensão do veículo, balanceamento dinâmico do veículo, peso do veículo, velocidade do veículo, manobras do motorista, etc. Embora a instalação dos sistemas WIM tenha sido feita em pavimentos de boa qualidade, algumas vezes ocorrem deterioração inesperada ou anomalias estruturais.

A seguir serão descritos alguns fatores que podem provocar erros nos sistemas. O erro em qualquer equipamento de pesagem de veículos é a diferença entre o peso indicado e o “peso estático real”, o qual é definido como o peso sob condições controladas e perfeitas, significando com isto, entre outras coisas, que o local da balança está absolutamente nivelado, que a suspensão do veículo está numa posição de repouso e não apresenta atrito de qualquer natureza, o veículo não está acelerando nem desacelerando.

A diferença entre a indicação do sensor e a carga aplicada é caracterizada pelo chamado erro intrínseco do instrumento. Já a diferença entre a carga aplicada e o “peso estático real” em outras condições, que não as controladas como anteriormente dito, pode ser chamada de erro devido aos “fatores externos”.

a) Erros devidos a fatores internos

O erro intrínseco pode ser determinado usando-se uma máquina de teste ou um peso (ou carga) padrão. Dependendo da tecnologia, ele pode ser mais ou menos influenciado por fatores tais como a temperatura, carga com característica excêntrica (desequilibrada), inclinação, curvatura, forças laterais, repetibilidade, aquecimento, umidade, susceptibilidade eletromagnética, etc.

Equipamentos utilizados para aplicação de lei devem, usualmente, ter seu modelo aprovado (aprovação de tipo - “*type approval*”) por organizações competentes e oficialmente incumbidas desta missão (no Brasil, INMETRO e seus agentes credenciados). Devem também ser individualmente testados antes de entrar em operação (aprovação pré-operação ou inicial).

b) Erros devidos a fatores externos

Existem inúmeros fatores externos que podem provocar erros de leitura nos equipamentos de pesagem, dentre eles podemos citar:

- Inclinação do veículo;
- Suspensão do veículo, atrito (friccional) na suspensão;
- Reação à frenagem e movimento oscilatório dos veículos (chassis e eixos)
- Frisos dos pneus;
- Forças aerodinâmicas;
- Instalação dos sensores (nivelamento);
- Rugosidade e planicidade do pavimento.

2.3.3 *Classificação dos sistemas de pesagem em movimento (ASTM E1318-02)*

As classes com as categorias dos sistemas de pesagem em movimento conforme a normatização ASTM E1318-02 são apresentadas a seguir.

As categorias de sistemas WIM são listadas na Tabela 4 juntamente com a aplicação e os dados disponibilizados pelos sistemas de cada classe (ASTM E1318- 02, 2002).

Uma descrição dos quatro tipos de classificação possíveis é apresentada a seguir:

- **Tipo I:** classifica os sistemas instalados em rodovias de uma ou mais pistas com finalidade para a contagem e classificação de veículos. Armazena as seguintes informações: carga por roda, carga por eixo, carga por grupo de eixo, peso bruto total, velocidade, espaçamento entre eixos, classe do veículo, identificação do posto, pista sentido e direção, data e hora, número sequencial de registro, distância entre eixos, ESAL, código da infração;
- **Tipo II:** classifica os sistemas instalados em rodovias de uma ou mais pistas com finalidade para a contagem e classificação de veículos. Armazena as mesmas informações do tipo I, exceto pelo item carga por roda;
- **Tipo III:** classifica os sistemas instalados em rodovias com uma ou mais pistas onde se deseja realizar procedimentos de pré-seleção de veículos, com identificação da aceleração. As informações como classe do veículo, distância entre eixos e ESAL não são necessárias;
- **Tipo IV:** classifica os sistemas instalados em rodovias com uma ou mais pistas onde se deseja realizar a fiscalização das cargas dos veículos que trafegam em velocidades de 3 a 16 km/h. Contém as mesmas informações do tipo III, porém com carga por eixo.

Tabela 4 – Categorias de Sistemas de pesagem em movimento (ASTM E1318-02)

Descrição do item	Classes ou Categorias			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Velocidade	16 a 130 Km/h	16 a 130 Km/h	16 a 130 Km/h	3 a 16 Km/h
Aplicação	Dados Coletados	Dados Coletados	Dados Coletados	Dados Coletados
Carga por roda	•		•	•
Carga por eixo	•	•		•
Carga por grupo de eixos	•	•	•	•
Peso bruto	•	•	•	•
Velocidade	•	•	•	•
Espaçamento entre eixos	•	•	•	•
Classe do veículo	•	•		
Identificação do posto	•	•	•	•
Pista/sentido de direção	•	•	•	
Data e hora	•	•	•	•
Nº Sequencial de registro	•	•	•	•
Distância entre eixos	•	•		
ESAL	•	•		
Código da infração	•	•	•	•
Aceleração			•	•

A Tabela 5 apresenta os requisitos de desempenho funcional dos sistemas WIM conforme definidos pela ASTM (ASTM E1318-02, 2002).

Tabela 5 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)

Função	Tolerância (95% de probabilidade)				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Kg	±Kg
Carga por roda	± 25%	-	± 20%	2300	± 100
Carga por eixo	± 20%	± 30%	± 15%	5400	± 200
Carga por grupo de eixos	± 15%	± 20%	± 10%	11300	± 500
Peso bruto	± 10%	± 15%	± 6%	27000	± 1100
Velocidade	± 2 km/h				
Espaçamento entre eixos	± 0,15 m				

A acurácia dos sistemas WIM é função de quatro principais fatores conforme descrito anteriormente, ou seja, dinâmica do veículo; integridade, composição e projeto do pavimento; variância inerente no sistema WIM e calibração. A Tabela 6 fornece alguns valores típicos para a acurácia para sistemas WIM.

Tabela 6 – Valores típicos de acurácia (intervalo de confiança $\pm 1\sigma$)

Tecnologia de Pesagem em Movimento	Acurácia na medida de carga por grupo de eixos	Acurácia na medida do peso bruto total
Cabo Piezelétrico	12%	10%
Sensor de Quartzo	10%	8%
“Bending plate”	3%	2%
Célula de carga	2%	1%

2.3.4 *Sistemas WIM no Brasil e no mundo – Estado da Prática x Estado da Arte*

A tecnologia de pesagem em movimento Weigh-in-Motion (WIM) é bastante difundida em diversos países europeus como Alemanha, Holanda, França, Suíça, entre outros. Nos Estados Unidos e na Austrália sua utilização é mais recente. Normalmente a tecnologia WIM é associada à videomonitoramento e serve de suporte à fiscalização na pré-seleção de veículos suspeitos de sobrecarga.

Na Europa, no que tange à fiscalização, a tecnologia WIM é usada predominantemente para dar suporte na pré-seleção de veículos, através de um monitoramento de cargas em tempo real. Para a fiscalização móvel e à programação desta atividade. Serve ainda a uma abordagem proativa ao controle do sobrepeso através da identificação de características sistemáticas da prática de sobrepeso, a serem foco de atividades preventivas, tais como empresas, motoristas, veículos ou tipos de cargas.

A tecnologia WIM está sendo amplamente usada para dar suporte ao controle de dimensões e peso dos veículos de carga na França. Sistemas WIM de alta velocidade (HS-WIM) estão sendo usados na pré-seleção em tempo real dos veículos a serem submetidos à fiscalização, no planejamento do dia, hora e local das atividades de fiscalização, e na prevenção, identificando transportadores ou motoristas reincidentes para receber cartas de advertência e visitas da fiscalização.

Na Suíça, por exemplo, utiliza-se ao longo das principais rodovias sistemas WIM que permitem pré-selecionar veículos suspeitos, que são escoltados pela polícia até o posto fixo de pesagem mais próximo onde peso e dimensões são aferidos. Confirmada a infração, a multa é aplicada, e o veículo retido até que o responsável realize o transbordo da carga.

Além de usar tecnologia WIM para dar suporte à pré-seleção, os holandeses usam dados históricos de pesagem WIM para programar hora e local da fiscalização. Utilizando dados da semana mais recente, e das seis últimas semanas, são determinados a hora, o dia da semana e os locais de maior atividade de veículos sobrecarregados. Países como Suíça, França, Holanda e Alemanha contam com sistemas bastante semelhantes.

De um modo geral, no que tange aos tipos de sensores utilizados nos equipamentos de pesagem em movimento, observa-se que os mais utilizados para aplicações rodoviárias são o piezo quartzo, o piezo cerâmico e o piezo polímero. Observou-se a existência de um grande desafio, na busca de se melhorar a precisão e os aspectos referentes à manutenção dos sensores.

Os níveis de precisão observados nos equipamentos de pesagem em movimento são suficientes para a aplicação de pré-seleção para posterior pesagem em balanças estáticas ou em equipamentos de pesagem em movimento à baixa velocidade. A França já está usando a pesagem a baixa velocidade para efeito de multa.

A França e a Holanda estão realizando pesquisas com o uso de múltiplos sensores, na busca de conseguir precisão suficiente que permita a completa automação no controle de peso e medidas dos veículos comerciais. Na opinião de fiscais e especialistas da França e Holanda, que lideram a pesquisa europeia nesta área, a completa automatização da fiscalização de peso dos veículos comerciais, empregando sistemas WIM de alta velocidade, ainda está de 5 a 20 anos distante.

Nos Estados Unidos, durante duas décadas, entre 1984 e 2004, os sistemas de pesagem em movimento (WIM) foram usados, quase que exclusivamente, como coletores de dados de peso, para fundamentar o projeto e a monitoração da performance dos pavimentos. A fiscalização do sobrepeso e sobredimensão eram tipicamente feitas através de postos fixos de pesagem estática.

Nos últimos anos, todavia, o uso destes sistemas está sendo expandido para o controle de fronteiras e o suporte à fiscalização de peso, com a disponibilização das chamadas estações virtuais de pesagem, utilizadas para filtrar do fluxo de tráfego os veículos suspeitos de violação

do limite legal de carga, permitindo a oferta de serviços de dispensa automática da fiscalização em estações fixas.

Esta mudança de foco (OLOUFA, 2007, SANTERO et al., 2005), baseou-se na constatação das vantagens do uso da tecnologia WIM, relacionadas a aspectos tais como:

- As estações fixas são facilmente contornadas por infratores (rotas de fuga);
- Aumentar a taxa de conformidade é a verdadeira meta da fiscalização;
- Poucos postos fixos podem monitorar a taxa de conformidade de uma região;
- Infratores habituais podem ser identificados remotamente;
- Veículos conformes não são perturbados;
- Veículos com sobrecarga, frequentemente não aparentam estar sobrecarregados.

Dados de pesagem em movimento acurados são essenciais para o sucesso de projetos considerados importantes pelos Americanos, como o de monitoramento da performance de longo prazo de pavimentos (*Long Term Pavement Performance – LTPP*), e o de desenvolvimento de novos métodos de projeto de pavimentos (GILLMANN, 2005).

A edição 2001 do “Guia de Monitoramento de Tráfego”, da FHWA, estimulou a tendência de usar sistemas de classificação de veículos, em vez de contadores de tráfego de uso contínuo, bem como de preferir os sistemas WIM permanentes (de alta velocidade), aos portáteis. Em consequência, observa-se que o uso de sistemas WIM, tanto na área de estudos de pavimentos quanto na de fiscalização, tende a crescer cada vez mais nos Estados Unidos.

Dentre a bibliografia analisada, tanto europeia quanto norte americana, o desafio principal dos sistemas de pesagem dinâmica Weigh-in-Motion (WIM) está em alcançar níveis suficientes de acurácia e confiabilidade nas pesagens a alta velocidade. Na sequência, a certificação metrológica destes sistemas, cuja complexidade exige o desenvolvimento de novos procedimentos de teste é outro objetivo a ser atingido. Por último, será preciso modificar a legislação, que, na maioria dos países, ainda exige medições de peso estáticas, ou a baixíssima velocidade.

Uma preocupação importante reside nos elevados valores de desvio padrão associados às medidas de peso efetuadas com determinados sensores empregados na tecnologia atual dos sistemas WIM de alta velocidade, o que exigiria a adoção de considerável tolerância na fiscalização. Esta alta tolerância nos limites de peso impediria, na opinião de alguns

pesquisadores, o uso destes sistemas na fiscalização direta automatizada, uma vez que estes não representariam um risco suficientemente alto para induzir a um comportamento legalmente aceito por parte da indústria do transporte.

No que tange o cenário brasileiro, um dos principais pilares de um bom sistema de gestão da operação rodoviária, o controle da prática do excesso de carga no transporte comercial rodoviário, vem sendo objeto de renovada atenção, em busca de mais eficiência e eficácia.

O uso da pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM) nesse controle não é novo no Brasil. Já em 1975 essa tecnologia foi selecionada para aplicação pelo Governo, no âmbito de um Plano Diretor de Pesagem. Assim, em 1978 o primeiro de uma rede de postos de pesagem de veículos (PPVs) começou a operar, usando um sistema WIM do tipo *bending plate* para pré-seleção a 60 km/h, e um sistema WIM do tipo *load-cell* para a fiscalização a 10 km/h.

A experiência brasileira, iniciada em 1978 com WIM de baixa velocidade. Ultimamente o governo anunciou investimentos de R\$ 1,5 bilhão na expansão dos sistemas de monitoramento de cargas pesadas nas rodovias brasileiras através do Plano Nacional de Pesagem com o desenvolvimento de um novo conceito de fiscalização de cargas denominados de PIAFs, ou seja, Postos Integrados Automatizados de Fiscalização.

Segundo DNIT, este sistema permitirá fiscalizar veículos em movimento, na velocidade de operação da via a ser fiscalizado através de uma pesagem rápida na pré-seleção dos veículos de carga. Dessa forma serão direcionados à pesagem de precisão apenas os veículos com suspeita de sobrecarga, aumentando em muito a eficiência da fiscalização e desonerando os condutores que trafegam dentro dos limites legais de cargas, pois os mesmos seguem viagem sem a necessidade de passar pelas balanças fixas de precisão.

Dentro do Plano Nacional de Pesagens estão os Convênios (TT-102/2007 e TT-320/2010) firmados entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT) e tem por objetivo desenvolver pesquisas inovadoras na área de pesagem em movimento para veículos de carga, alinhadas com as novas tecnologias desenvolvidas na Europa e nos EUA, tendo como foco a identificação, avaliação e especificação de sistemas de pesagem em movimento ajustados à realidade brasileira, com a utilização de múltiplos sensores (MS-WIM) e a avaliação do efeito do sobrepeso na vida útil do pavimento.

O desenvolvimento da pesquisa aponta para um conjunto de benefícios relacionados à melhoria da eficácia e eficiência da prevenção e fiscalização de peso, indicando o estabelecimento de um novo paradigma na fiscalização do excesso de cargas no país, com redução de custos operacionais e aumento da efetividade na fiscalização (DNIT, 2015).

Outra importante pesquisa realizada no intuito de avaliar sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (HS-WIM) é a Pesquisa WIM realizada no Rio Grande do Sul intitulada “*Uso da tecnologia Weight-in-motion (WIM) para avaliação do desempenho de pavimentos asfálticos*”. A pesquisa foi motivada principalmente pela pesquisa anteriormente realizada e intitulada “*Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)*” (Brito e Bock, 2013 & Brito et al., 2013), que abordou o uso da tecnologia de pesagem em movimento (WIM) no sul do Brasil com excelentes resultados obtidos para demonstração do real espectro de cargas na BR-290/RS.

As pesquisas citadas foram desenvolvidas em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul através do Laboratório de Pavimentação (LAPAV), empresas do setor privado (PRIME e S&T), a Concessionária da Rodovia Porto Alegre Osório (CONCEPA) com financiamento da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) através de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT).

No contexto apresentado, as pesquisas, mecanismos e sistemas mencionados anteriormente na revisão aqui realizada sobre sistemas de pesagem em movimento constituem o atual estado da Prática referente ao assunto. Ainda que os sistemas WIM de alta velocidade tenham maior eficiência, sabe-se que estes sistemas ainda não têm elevada precisão, impossibilitando seu uso para aplicação da lei.

O nível de precisão das medidas ainda é um desafio, ainda está abaixo dos patamares de excelência, sendo um tema amplamente analisado e discutido para a definição de normas que regulamentam o setor de cargas e seu uso na fiscalização dos veículos. Os aprimoramentos técnicos demandam ampla série de pesquisas e testes, e a integração do WIM a outros sistemas, como os de medição de ruído, emissões e deterioração do pavimento.

Segundo especialistas e pesquisadores do assunto, a expansão do uso de sistemas WIM depende da aceitação de todos os envolvidos no transporte de cargas: órgãos dos diversos níveis do governo responsáveis pelo planejamento e execução de infraestruturas ou pela fiscalização;

empresários do setor de transportes ou fornecedores das obras licitadas pelo governo; clientes do transporte de carga ou usuários das rodovias em que trafegam os caminhões; universidades e institutos públicos e privados que desenvolvem pesquisas no setor.

O estado da arte destes sistemas constitui em aumento da acurácia, principalmente nos sistemas de alta velocidade (HS-WIM) e sua certificação para uso não somente na coleta de dados, mas também na aplicação da lei, na forma de multas diretamente aplicadas aos veículos infratores através de sistemas totalmente automatizados.

Os sistemas de pesagem em movimento (WIM) têm sido objeto nas últimas décadas de cada vez maior utilização e mais pesquisa, especialmente com foco em melhores métodos de calibração, novos procedimentos para aumento da velocidade de pesagem e novas tecnologias, em especial no que diz respeito aos sensores empregados.

Segundo informações do 1º Seminário Internacional de Pesagem em Movimento, realizado em Florianópolis em 2011, para que as novas tecnologias possam ser utilizadas para controle de sobrepeso nas estradas brasileiras, órgãos como DNIT, INMETRO, Ministério dos Transportes, fabricantes de equipamentos e operadores de balanças estão trabalhando na avaliação e elaboração de procedimentos para a normalização do uso da WIM no Brasil. O INMETRO afirma que está trabalhando em novas regulamentações destes instrumentos, estabelecendo os requisitos técnicos, metrológicos, para o WIM no Brasil.

Nos Estados Unidos, um grande esforço de produção de Normas e Padrões está sendo feito, decorrente da constatação de que adotar estações de pesagem virtual exige um alto nível de acurácia e confiabilidade dos dados WIM, nível este que só pode ser conseguido com um rigoroso programa de controle de qualidade.

2.4 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Um pavimento flexível é aquele que tem revestimento asfáltico e camadas de base e sub-base granular. A distribuição das tensões e deformações, geradas na estrutura pelas cargas provenientes do tráfego, se dá de modo que o revestimento e camadas granulares aliviem as tensões verticais de compressão no subleito por meio da “absorção” de tensões cisalhantes (GONÇALVES, 1999).

Neste processo, ocorrem tensões e deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, as quais provocarão durante a vida útil seu trincamento por fadiga com a repetição das cargas do tráfego (Figura 14). Ao mesmo tempo, a repetição das tensões e deformações verticais de compressão que atuam em todas as camadas do pavimento levarão à formação de afundamentos em trilha de roda, quando o tráfego tender a ser canalizado, e à ondulação longitudinal da superfície, quando a heterogeneidade do pavimento for significativa.

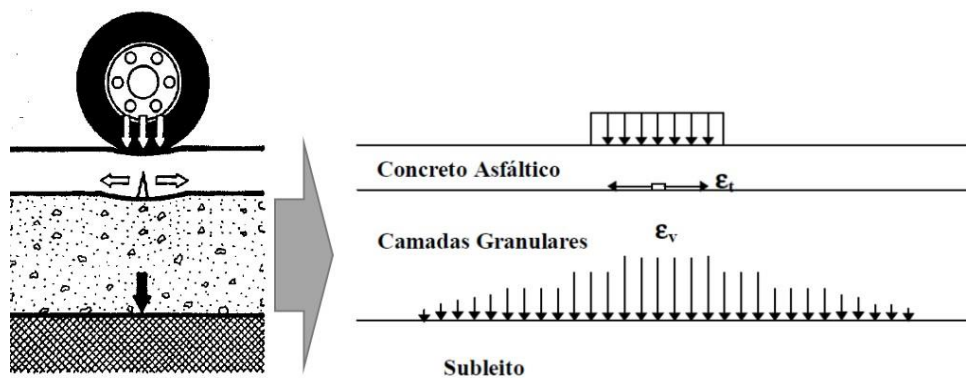


Figura 14 – Seção típica de um pavimento flexível com principais efeitos gerados pelo tráfego (adaptado Medina e Motta, 2015)

Sob o ponto de vista da engenharia, a estrutura de um pavimento rodoviário deve ser conseguida com a máxima qualidade e mínimo custo. Os pavimentos devem possuir duas funções primordiais relacionadas com o usuário e com os veículos que trafegam sobre o mesmo:

- a) **Em relação ao usuário**, o pavimento rodoviário deve exercer a função de proporcionar conforto, segurança e economia aos veículos destinados ao transporte de passageiros e de cargas, mediante a construção de uma superfície de rolamento tecnicamente adequada.
- b) **Em relação ao tráfego e condições ambientais**, o pavimento rodoviário deve exercer a função estrutural de receber as solicitações oriundas do tráfego, em que as variadas camadas devem promover a distribuição das tensões aplicadas na superfície, de tal forma que o subleito receba uma parcela bem atenuada desta tensão superficial.

Desempenho é um termo genérico utilizado para designar a forma como os pavimentos mudam de condição ou servem sua função com o uso e o decorrer do tempo. A sua definição exata varia com o nível de gerência em que é utilizado (rede ou projeto).

De forma ampliada, o desempenho de um pavimento depende de uma série de fatores e vários indicadores podem ser utilizados para quantificá-lo: desde indicadores da sua condição funcional (coeficiente de atrito superficial, qualidade de rolamento), a extensão e severidade dos diferentes tipos de degradação, até indicadores da condição estrutural.

Como toda obra de engenharia, uma rede de pavimentos é um produto destinado a atender determinadas necessidades, porém com um prazo de vida útil estimado relacionado a um custo de implantação, operação e manutenção. Os pavimentos não são concebidos para durarem eternamente, mas apenas para um determinado período.

Durante cada um destes períodos ou “ciclos de vida”, o pavimento inicia numa condição ótima até alcançar uma condição ruim (Figura 15), após atingir uma condição mínima há a necessidade de intervenções de reabilitação para elevar os níveis de serventia novamente a níveis aceitáveis. Com o aumento do volume de tráfego comercial, da carga por eixo e da pressão de inflação dos pneus, muitos pavimentos têm apresentado falência prematura.

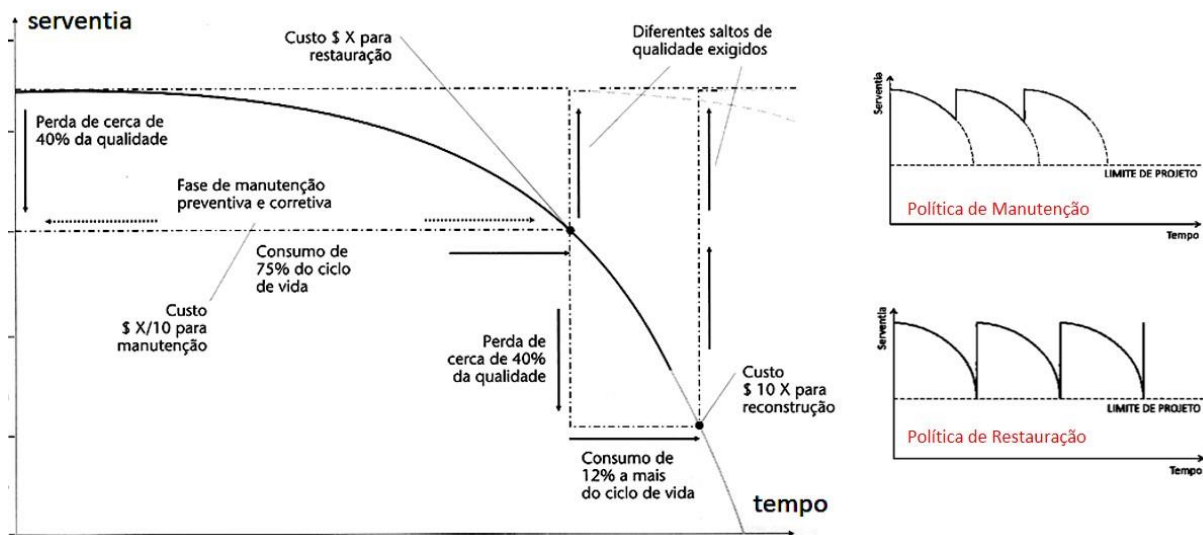


Figura 15 – Conceito de serventia (HAAS e HUDSON, 1978 adaptado por BALBO, 2007)

O entendimento dos mecanismos que regem o processo de degradação de um pavimento é condição essencial para a identificação das causas que o levam à sua condição atual, bem como para a escolha e programação da técnica mais adequada para sua reabilitação.

Muitos fatores afetam o desempenho a ser oferecido por um determinado pavimento, dentre estes se destacam: o número e a magnitude das cargas do tráfego, as propriedades dos materiais componentes das camadas e a sua heterogeneidade ao longo da via, a natureza do solo de subleito, a frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo, as condições de drenagem e aspectos ambientais.

Dentre os fatores citados, a ação conjugada do tráfego e do clima são considerados os principais causadores da degradação dos pavimentos flexíveis, principalmente ao se tratar de trincamento por fadiga e afundamento em trilha de roda.

2.4.1 Principais parâmetros de influência no desempenho

No presente item serão apresentados os principais parâmetros de influência no desempenho de pavimentos flexíveis. Anteriormente já foi realizada uma síntese e descrição da importância do tráfego solicitante no desempenho e conseqüentemente na degradação dos pavimentos rodoviários.

A seguir serão apresentados brevemente demais parâmetros que afetam o desempenho de pavimentos flexíveis, conceitos estes que serão observados e contabilizados do decorrer do desenvolvimento da presente pesquisa através da implantação e monitoramento de trechos rodoviários em duas rodovias federais no estado do Rio Grande do Sul, conforme detalhado na metodologia da presente pesquisa.

- *Qualidade dos materiais e técnicas construtivas:*

Em relação aos materiais empregados na construção de um pavimento destaca-se a importância do controle tecnológico, importante ferramenta para a verificação da conformidade e do atendimento às especificações de projeto.

Os materiais devem ser definidos levando-se em consideração razões técnicas, econômicas e ambientais, sendo que do ponto de vista técnico eles devem atender principalmente aspectos quanto à resistência frente às solicitações (carregamentos), condições climáticas (principalmente temperatura no caso de materiais betuminosos) a que estarão submetidos.

A execução de uma obra demanda inicialmente a escolha de materiais adequados, que devem atender especificações vigentes, as quais determinam os índices mínimos de qualidade necessários.

Além de uma correta escolha dos materiais, a qualidade da execução das diversas camadas do pavimento também é fator primordial para garantir um bom desempenho da estrutura durante a sua vida útil. Deve-se atender às especificações técnicas quanto ao controle de qualidade das camadas através da utilização de técnicas executivas adequadas.

Controle granulométrico, teor de umidade, grau de compactação adequado, controle defletométrico e de espessuras das camadas granulares são alguns dos principais controles executivos necessários para garantir uma boa estrutura. Um bom desempenho desta estrutura irá depender também de controle adequado das características de resistência do subleito e da qualidade de execução e dos materiais empregados nas camadas asfálticas.

- *Fatores Climáticos e Condições Ambientais:*

O clima e as condições ambientais são fatores importantes a serem considerados, principalmente pavimentos flexíveis. Estes fatores atuam no estado dos materiais empregados influenciando no dimensionamento e por consequência no desempenho futuro da estrutura.

As influências das condições ambientais manifestam-se basicamente em dois locais distintos da estrutura, ou seja, no subleito e no revestimento asfáltico. Medina (1997) ressalta a importância da ação do clima nas rodovias, elencando em vários itens, a influência da precipitação atmosférica e radiação solar no desempenho dos pavimentos.

No subleito, a influência da oscilação do lençol freático em função de precipitações atmosféricas pode levar a saturação da camada quando não há um adequado sistema de drenagem, fato que acaba influenciando de forma significativa sua capacidade de suporte. A precipitação atmosférica pode atingir também o subleito pelos acostamentos, se estes não são revestidos, por infiltração não interceptada por drenos e através de trincas e juntas não vedadas e poros de revestimentos envelhecidos.

A variação da temperatura atuante sobre a camada de revestimento asfáltico, principalmente na camada de rolamento (mas também em camadas intermediárias), influenciará de forma significativa nas propriedades dos materiais asfálticos empregados nas camadas. Para um bom desempenho, este parâmetro deverá ter minimizado os seus efeitos, principalmente quanto à exsudação, o envelhecimento e o trincamento de natureza térmica do revestimento asfáltico, mediante a utilização de ligante asfáltico com consistência e ponto de amolecimento adequadamente definidos.

A temperatura do pavimento varia com as localizações geográficas, as horas do dia e as estações do ano. A variação da temperatura tem influência na rigidez dos revestimentos asfálticos e na deformabilidade dos pavimentos, ou seja, há uma grande dependência do pavimento com os fatores climáticos. A maior ou a menor rigidez nas misturas asfálticas em função da temperatura. Se variar a rigidez modifica-se automaticamente a distribuição de tensões, a vida da fadiga e a resistência a deformação plástica (Medina e Motta, 2015).

Algumas mudanças climáticas intensas no planeta estão sendo monitoradas e estudadas quanto ao seu impacto nos sistemas de transportes. Segundo o relatório do *Transportation Research Board* (TRB, 2008 *apud* Medina e Motta) foram ressaltadas algumas mudanças climáticas com importância especial para os sistemas de transportes. Dentre estes fatores estão relacionados: o crescimento do número de dias muito quentes e ondas de calor cada vez mais frequentes; o crescimento nas temperaturas no ártico, o que afetará na temperatura no inverno nos países mais próximos e; o crescimento na intensidade das chuvas.

Com base nesse relatório observa-se a necessidade de considerar estes aspectos no planejamento, projeto, construção, operação e manutenção dos pavimentos. BERNUCCI (1995) já destacava a consideração da temperatura na previsão da possibilidade de perdas de umidade dos materiais durante os serviços de compactação e mesmo depois de compactados e também o comportamento das misturas betuminosas.

- *Características do tráfego solicitante*

A influência do tráfego solicitante, não somente pelo volume de veículos pesados, mas principalmente pela magnitude das cargas transportadas por eixo, já foi descrita anteriormente. Porém, vale ressaltar a inter-relação do carregamento com os demais fatores recém descritos, ou seja, materiais empregados e condição climática.

A temperatura e a velocidade de aplicação da carga (ou frequência) são os dois principais fatores do meio ambiente que afetam a resistência à fadiga e a resistência às deformações permanentes dos concretos asfálticos (CA). Temperaturas elevadas e velocidades baixas de carregamento aumentam o risco ao surgimento de deformações permanentes, já temperaturas medianas ou baixas associadas a velocidades mais elevadas favorecem mais ao trincamento por fadiga do revestimento asfáltico.

As informações sobre volume de tráfego coletadas de forma aleatória, defasadas e muitas vezes sem indicação de metodologia de trabalho, são deficiências que repercutem de forma substancial na definição do pavimento durante a fase de projeto ou atividades de manutenção e restauração.

A falta de fiscalização das rodovias brasileiras, tanto para controle de excesso de cargas transportadas quanto para fins meramente estatísticos são dificuldades encontradas pelos projetistas para realização de uma estimativa mais realista das solicitações que o pavimento sofrerá durante a sua vida útil, tanto para projeto de rodovias novas, quanto para realização de planos de manutenção e reabilitação de pavimentos. Na falta destes dados mais detalhados, os pavimentos projetados acabam sofrendo com a manifestação precoce dos mecanismos de degradação, tendo sua vida útil reduzida significativamente.

Com a evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos, deixando de lado metodologias totalmente empíricas e partindo-se para concepção de estruturas através do emprego de análises mecánísticas do pavimento (métodos mecánístico-empíricos), a necessidade de dados cada vez mais apurados das características dos materiais que compõe a estrutura e dos níveis de solicitação torna-se fundamental para o desenvolvimento de um projeto cada vez mais refinado, técnica e economicamente.

Dada a complexidade do comportamento da estrutura, considerando a viscoelasticidade do material e a aplicação de carregamentos dinâmicos com cargas e velocidades variadas, uma série de simplificações são empregadas. Estas simplificações nas análises da resposta do material frente ao carregamento imposto ou simplificações deste carregamento aplicado (magnitude e forma) podem futuramente levar a uma degradação prematura do pavimento, comprometendo o seu desempenho.

2.4.2 Principais mecanismos de degradação

Segundo Specht (2004), a degradação de pavimentos está associada a várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga, retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes.

O desempenho satisfatório do revestimento asfáltico depende da obtenção de uma mistura com distribuição granulométrica adequada de agregados e de um teor ideal de ligante asfáltico, de modo a proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fissuras e desagregações, sem se tornar instável às condições impostas.

Os pavimentos rodoviários desenvolvem ao longo do período de serviço degradações que contribuem para uma diminuição de sua qualidade estrutural e funcional. Essas degradações são originadas principalmente pelas ações do tráfego e as condições climáticas, as quais atuando sobre um pavimento com determinadas características mecânicas e geométricas originam solicitações no pavimento que alteram as suas características iniciais.

A sucessiva repetição destas condições origina degradações no pavimento, que se caracterizam por um decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo. Além dos mecanismos de solicitação comentados acima, existem ainda mecanismos de degradação relacionados aos materiais empregados (relacionados diretamente ao padrão de qualidade) e àqueles relacionados aos métodos de construção.

Na Tabela 7, adaptada do *Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos* (DNER, 1998), são apresentados os principais fatores associados à degradação dos pavimentos asfálticos.

Tabela 7 – Categorias de defeitos nos pavimentos

CAUSAS GENÉRICAS	CAUSAS ESPECÍFICAS	TIPOS DE DEFEITOS
Tráfego	Cargas repetidas (fadiga) Carga Excessiva Escorregamento da capa Fluência plástica	Trincamentos Ruptura do revestimento Trincas côncavas Deformação por deslocamento da capa
	Densificação (compactação) Degradação do Agregado	Trilha de roda Desagregação
Clima	Mudanças de Umidade (retração/expansão)	Trincas Exsudação
	Mudanças térmicas	
Métodos Construtivos	Compactação com temperatura inadequada	Formação de trincas
	Compactação deficiente	Deformação
Materiais	Falta de qualidade	Desagregações

Os principais mecanismos que interferem no desempenho do pavimento são originados pelo tráfego (através da degradação estrutural gerada pelas tensões aplicadas pelos veículos de carga) e pelas ações do clima (com variações de temperatura e umidade) que causa a oxidação do ligante do revestimento asfáltico e a modificação das propriedades dos materiais constituintes das camadas subjacentes na presença de umidade excessiva.

Os materiais constituintes de um pavimento obedecem, em geral, a leis de comportamento mecânico intrínseco, cuja descrição completa permite fornecer os parâmetros necessários ao cálculo na previsão dos fenômenos mecânicos.

Uma simples observação dos principais tipos de defeitos que ocorrem num pavimento flexível permite identificar os dois mais importantes modos de solicitação mecânica que podem provocar degradações, os quais requerem atenção especial, devido à magnitude que ocorrem e, principalmente, porque são problemas estruturais: a compressão que promove o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, e a flexão alternada, que conduz à fadiga do revestimento asfáltico (ROBERTS *et al.*, 1991).

Estes fatores interferem significativa e diretamente na vida útil estimada para um pavimento asfáltico, que com a idade passa a ter sua integridade reduzida à uma condição inferior da projetada devido a diminuição das propriedades funcionais e estruturais.

Os mecanismos de degradação, oriundos principalmente das solicitações do tráfego e condições climáticas às quais o pavimento está exposto, reduzem seu desempenho funcional e estrutural em função de uma contínua degradação que ocorre no pavimento durante a sua vida útil.

Segundo DNIT (2006), o desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é a de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento.

A grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, na superfície do pavimento, que melhor se correlaciona com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança, a velocidade e a economia das viagens corresponde à irregularidade longitudinal. Definida pela Norma DNER - PRO 164/94 como sendo “o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade ao rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”.

Já o desempenho estrutural refere-se à capacidade de um pavimento em manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas. Os ensaios defletométricos são os mais apropriados para a interpretação do comportamento estrutural do pavimento.

As falhas ou defeitos nos pavimentos são classificadas de acordo com as Normas DNIT 005/2003-TER. A condição atual do pavimento é definida em função dos níveis de trincamento, deformação ou desagregação. Estes mecanismos de degradação são apresentados sucintamente a seguir de acordo com as descrições do *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos* do DNIT (2006).

a) Mecanismos de Trincamento

Os revestimentos betuminosos tendem a sofrer trincamento em algum estágio de suas vidas sob as ações combinadas do tráfego e das condições ambientais, por meio de um ou mais mecanismos. A trinca é um defeito que enfraquece o revestimento e ao chegar na superfície permite a entrada da água, provocando um enfraquecimento adicional da estrutura. Uma vez iniciado, o trincamento tende a aumentar sua extensão e severidade conduzindo eventualmente a desintegração do revestimento. Na Tabela 8 são apresentados os principais tipos de trincamentos juntamente com as causas e exemplos de defeitos gerados.

Tabela 8 – Resumo principais tipos de trincamento (adaptado DNIT, 2006)

Principais tipos de trincamento	Causas	Exemplo de defeitos
Fadiga	Resultante dos efeitos cumulativos do carregamento sucessivo	Trincas “couro de jacaré”, usualmente confinadas nas trilhas de roda
Envelhecimento	Aumento da rigidez ligante asfáltico em função de sua exposição às condições climáticas tornando-o mais suscetível ao trincamento	Trincamento irregular com espaçamento maior que 0,5m; após iniciado tende a propagar-se por toda área coberta pelo revestimento
Reflexão	Propagação de trincas existentes em uma camada inferior em direção à superfície, atingindo o revestimento asfáltico	Podem apresentar-se sob a forma de qualquer tipo de trinca: longitudinal, irregular ou mesmo interligada
Outros	Alta rigidez do ligante asfáltico em baixas temperaturas ocasionando retração térmica	Trincas longitudinais e transversais;
	Umidade no Acostamento	Trincas longitudinais próximas à borda
	Recalque do terreno de fundação ou ruptura de aterros	Trincas longas, longitudinais ou parabólicas

b) Mecanismos de Deformações

Entre as deformações permanentes em pavimentos, incluem-se os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Esses defeitos causam acréscimos na irregularidade longitudinal afetando a dinâmica das cargas, a qualidade de rolamento, o custo operacional dos veículos e, devido ao acúmulo de água, riscos à segurança dos usuários.

As causas das deformações podem estar ou não associadas ao carregamento do tráfego como pode ser observado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Resumo das causas e tipos de deformações permanentes (adaptado DNIT, 2006)

Causa Geral	Causa Específica	Exemplo de defeito
Associadas com o Carregamento	Carregamento concentrado e em excesso	Fluência Plástica (Ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo (creep)
	Grande número de repetições de carga	Afundamentos nas trilhas de roda
Não associadas com o Carregamento	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

c) Mecanismos da Desagregação

A desagregação pode ser definida como a perda do agregado superficial devido a fratura mecânica do filme do ligante asfáltico ou pela perda de adesão entre o ligante asfáltico e o agregado (o que na presença de água é também chamado de arrancamento). A fratura mecânica do filme de ligante que envolve o agregado ocorre quando o ligante asfáltico torna-se muito endurecido ou o filme muito esbelto, para fazer frente aos esforços gerados na área de contato pneu-pavimento.

O desgaste começa a se desenvolver quando a viscosidade do ligante cai significativamente devido à evaporação dos óleos mais leves do cimento asfáltico (envelhecimento). Isto ocorre devido ao aquecimento exagerado no processo de usinagem ou em função da oxidação durante longa exposição às temperaturas ambientais.

d) Interações Entre os Defeitos (DNIT, 2006)

Os mecanismos de deterioração das rodovias pavimentadas são influenciados pelas características do revestimento, que é consideravelmente mais resistente ao desgaste e ação da água, do que os materiais granulares utilizados para construção das demais camadas do pavimento.

O processo de deterioração apresentado por um pavimento pode ser sentido pela variação das condições de sua superfície ao longo do tempo e os mecanismos apresentados anteriormente, trincamentos, afundamentos e desagregação, são os principais que regem este processo. Sua interação é que vai definir a condição funcional e estrutural de um pavimento em determinado momento de sua vida útil. A seguir é apresentada uma breve explicação sobre este fenômeno e na Figura 16 pode-se visualizar a interação entre estes principais processos de degradação.

Conforme apresentado anteriormente, sabe-se que as cargas provenientes do tráfego induzem tensões e deformações no interior da estrutura do pavimento. Essas tensões e deformações são função da magnitude do carregamento, dos módulos e espessuras das camadas constituintes do pavimento e da capacidade de suporte do subleito.

A ação do carregamento repetido propicia o desenvolvimento do fenômeno de fadiga nas camadas tratadas (com asfalto ou estabilizantes químicos) e a deformação de qualquer das camadas constituintes do pavimento, e também do subleito. Nos revestimentos betuminosos assentes sobre camadas granulares, o processo de deterioração é controlado pelo nível das deformações específicas de tração ocorrentes na face inferior da camada do revestimento e/ou pelas deformações específicas de compressão no topo do subleito (DNIT, 2006).

A ação dos agentes das intempéries (chuva e variação da temperatura) fazem com que a mistura asfáltica, que constitui a camada de revestimento, torne-se progressivamente mais quebradiça e susceptível ao trincamento e à desagregação. Uma vez iniciado, o trincamento progride em área afetada e severidade, até o ponto da desintegração das bordas das trincas e, posteriormente, provoca o arrancamento das placas e formação de painéis.

As trincas abertas na superfície, permitem a entrada de água no interior do pavimento e, desta forma, aceleram o processo de deterioração, reduzem a resistência ao cisalhamento dos materiais não tratados e aumentam a velocidade da deformação gerada pelas tensões

provenientes dos carregamentos induzidos pelo tráfego, intensificando desta forma a degradação estrutural do pavimento.

O somatório das deformações ocorrentes em toda a estrutura do pavimento manifesta-se pelos afundamentos nas trilhas de roda e pelas distorções do perfil longitudinal do pavimento. Estes defeitos no pavimento promovem um aumento na irregularidade longitudinal da rodovia.

Portanto, o aumento da irregularidade longitudinal, que é um dos principais parâmetros de avaliação das condições funcionais da rodovia, é o resultado de uma cadeia de mecanismos de restauração e combina os efeitos de vários tipos de defeitos e, como tal, não pode ser considerada como um efeito isolado.

A seguir na Figura 16 é apresentada de forma esquematizada a interação entres os principais mecanismos de degradação de pavimentos e o comportamento dos afundamentos por trilha de roda em função das condições de conservação do revestimento e a presença de umidade, conforme descrito no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, DNIT (2006).

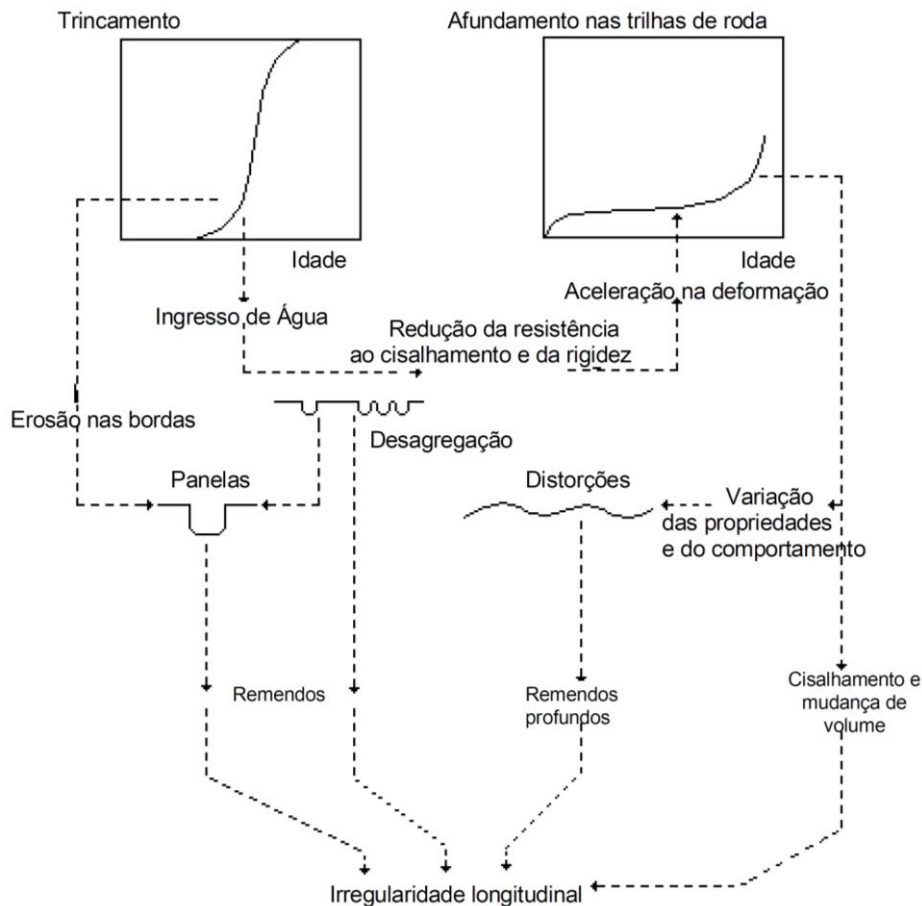


Figura 16 – Interações entre os defeitos em rodovias pavimentadas (DNIT, 2006)

Os diversos mecanismos de degradação apresentados e as suas interações afetam de diferentes maneiras o desempenho de um pavimento rodoviário. Na Tabela 10 estão apresentados os impactos dos defeitos superficiais no desempenho de um pavimento, principalmente no conforto ao rolamento, resistência à derrapagem, drenagem superficial e na integridade estrutural segundo Silva (2008).

Tabela 10 – Impacto dos defeitos superficiais no desempenho do pavimento (SILVA, 2008)

Defeitos	Conforto	Resistência à derrapagem	Integridade Estrutural	Drenagem Superficial
Trinca transversal	X	-----	X	-----
Trinca longitudinal	-----	-----	X	-----
Trinca couro-de-jacaré	-----	-----	X	-----
Trinca em bloco	X	-----	X	-----
Afundamento de trilha de roda	X	X	-----	X
Exsudação	-----	X	-----	-----
Buraco/panela	X	-----	X	-----
Remendo	X	-----	X	-----

2.4.3 Conservação e programas de monitoramento

A tecnologia envolvida em projetos de pavimentos vem evoluindo, desde os procedimentos baseados em tentativa e erro, anteriores a 1920, até o desenvolvimento de um sistema no qual se integra todas as atividades envolvidas na administração de uma malha viária, ou seja, planejamento, projeto, construção, manutenção, monitoramento e pesquisa.

Esta evolução, que acompanha o aumento da demanda por pavimentos rodoviários de boa qualidade que ofereçam maior durabilidade, melhores condições funcionais, em termos de segurança e de conforto ao usuário, e uma utilização mais econômica e racional dos recursos e materiais disponíveis, está envolvida no gerenciamento de uma malha viária e principalmente em propostas de desenvolvimento de novos métodos de dimensionamentos.

No Brasil, apesar de o modal rodoviário ser responsável pela grande maioria de transporte de cargas e passageiros, o setor apresenta carências históricas em termos de infraestrutura. Nas últimas décadas os pavimentos asfálticos brasileiros têm tido seu desempenho comprometido devido a fatores como o crescente aumento do volume de tráfego de veículos pesados, e a circulação com excesso de carga, fatores estes somados à carência de programas de manutenção fazem com que os pavimentos tenham suas vidas úteis expressivamente reduzidas.

O controle dos principais mecanismos de degradação e o estabelecimento de modelos matemáticos de previsão de desempenho dos pavimentos são atividades essenciais para a eficácia da gerência de uma determinada rede pavimentada.

Um dos principais problemas da tecnologia de pavimentação é encontrar a relação existente entre as características da estrutura do pavimento, as condições climáticas e de tráfego a que ele estará submetido e o desempenho que se pode esperar para o pavimento.

Conforme contexto apresentado e discutido no decorrer da revisão bibliográfica, apesar da histórica priorização do modal rodoviário, existem muitas melhorias a serem implantadas para garantir um nível de serviço adequado ao transporte rodoviário. De acordo com Silva (2009), paralelamente aos investimentos necessários, é importante também o desenvolvimento de técnicas mais realistas de projeto, de análise mecânica de tensões e deformações, e de construção e reabilitação de pavimentos, que resultem em uma maior confiabilidade na qualidade destes pavimentos.

A tarefa melhorar o desempenho dos pavimentos é uma atividade complexa e se constitui num desafio constante. Para vencê-lo, diversos programas de pesquisas vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo em vários países. Dentre estes destacam-se as pesquisas do tipo *Long Term Pavement Performance*, ou seja, Programas de Monitoramento de Pavimentos à Longo Prazo.

Esses estudos têm como objetivo comum propiciar aos responsáveis pelo processo de tomada de decisão e, aos técnicos rodoviários, informações e ferramentas capazes de auxiliá-los nas atividades de projeto e manutenção dos pavimentos, de modo que estes possam oferecer um bom desempenho ao longo de sua vida de serviço.

As primeiras ideias sobre conservação das vias podem ter surgido por volta de 1750, propostas por Pierre Marie Jerome Tresaguet, que introduziu inovações referentes ao projeto de pavimentos, como a adoção de menores espessuras de revestimento e a execução de bases compactadas e bem drenadas para suportar as cargas aplicadas. No entanto, o mais importante para a gerência de pavimentos foi o fato de Jerome Tresaguet reconhecer a necessidade de uma manutenção contínua (HAAS et al., 1978).

Em 1920, com a criação do Highway Research Board (HRB), multiplicaram-se as pesquisas em pavimentação, cujo objetivo comum era melhorar e aperfeiçoar os projetos e métodos de construção. Essas pesquisas englobaram estudos teóricos e empíricos.

Um dos maiores esforços empreendidos no sentido de se compreender o desempenho oferecido por pavimentos em serviço foi implantado no início da década de 80 nos Estados Unidos através do *Transportation Research Board* (TRB), da *Federal Highway Administration* (FHWA) e com a cooperação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) oportunidade na qual iniciou-se um estudo denominado de *Strategic Transportation Research Study* (STRS), com seu foco principal na deterioração do sistema de infraestrutura de rodovias e pontes. Esse estudo foi publicado em 1984 e recomendava a pesquisa em seis áreas estratégicas, destacando-se como uma dessas áreas o programa *Long-Term Pavement Performance* (LTPP) (ELKINS et al., 2003).

Esse programa foi iniciado em 1987, como parte do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), sendo que a responsabilidade pela gerência do programa foi transferida para o FHWA em 1992. Esse estudo compreendeu o monitoramento de seções de pavimentos em serviço por 20 anos, com a avaliação de mais de 2.400 seções de pavimentos flexíveis e rígidos, constituindo a maior pesquisa sobre desempenho de pavimentos.

O programa LTPP-FHWA foi criado para suprir a necessidade de informações sobre o comportamento dos pavimentos rodoviários, sendo que as análises realizadas têm como objetivos principais a determinação de modelos de previsão de desempenho para utilização nos projetos e na gerência de pavimentos e na análise dos efeitos específicos sobre os pavimentos das ações do tráfego, do meio ambiente, dos tipos de materiais, da qualidade da construção e das práticas de manutenção (ELKINS et al., 2003).

Além dos programas mencionados e desenvolvidos na América, especialmente nos Estados Unidos e no Canadá, outros programas de monitoramento de desempenho merecem destaque, como os realizados pela AUSTROADS (Associação de Autoridades de Transporte Rodoviário e Tráfego da Austrália e Nova Zelândia) que participou da pesquisa SHRP-LTPP, através do financiamento de um programa semelhante na Austrália (AUSTROADS- LTPP) para monitorar uma série de seções de pavimentos na Austrália e Nova Zelândia.

O início do programa ocorreu em 1994 e seu objetivo principal consiste na obtenção de dados de desempenho de pavimentos australianos em uso, a fim de desenvolver novos modelos de desempenho de pavimentos, bem como para calibrar os modelos existentes. Estes programas de monitoramento à longo prazo de pavimentos ajuda a entender o comportamento do pavimento e aumenta a acurácia na sua previsão de desempenho futuro, que é um elemento chave para a construção e manutenção de uma rede de estradas com um melhor custo-benefício.

Segundo informações da própria associação, membros da AUSTROADS são coletivamente responsáveis pela gestão de mais de 900.000 quilômetros de estradas e investimentos da ordem de mais de US\$ 200 bilhões, representando a maior comunidade ativa na Austrália e Nova Zelândia. Em valores médios, a cada ano são investidos US\$ 18 bilhões em estradas em toda a Austrália e Nova Zelândia (AUSTROAS, 2013).

A AUSTROADS é reconhecida pela liderança no fornecimento de informações de alta qualidade e assessoria e fomento à pesquisa nos setores de transporte rodoviário. Com o objetivo de promover melhores resultados de transporte na Austrália e Nova Zelândia, a associação fornece apoio técnico especializado para o desenvolvimento da política nacional sobre as questões rodoviárias e de transportes, promove a melhoria da prática e da capacidade por agências rodoviárias e favorece a coerência das operações da agência de estrada e estrada.

A importância de um bom sistema de transportes, com vias bem conservadas, é primordial para o desenvolvimento de qualquer nação. De acordo com a comissão de produtividade da AUSTROADS foi possível identificar que uma melhoria de 5% no setor rodoviário poderia aumentar o PIB da Austrália em cerca de US\$ 2,4 bilhões.

Portanto, o investimento em medidas de melhoria proveniente das agências de transporte resultará em significativa melhoria econômica, social e ambiental que retorna para a comunidade, envolvendo prosperidade econômica e melhor qualidade de vida da população (AUSTROAS, 2013).

Programas semelhantes aos apresentados anteriormente também foram iniciados no Brasil. Entre 1975 e 1981, foi conduzida a Pesquisa denominada de “Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR)”, desenvolvida pela extinta Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1982). Tratavam-se de levantamentos realizados em bases de dados disponíveis sobre a malha rodoviária nacional.

No contexto atual, visando entender melhor o comportamento e o desempenho de pavimentos tipicamente brasileiros com acompanhamento do comportamento de trechos-teste em diversas regiões do país e dessa forma estabelecer fatores “laboratório-campo” através de um banco de dados recolhido por meio de acompanhamento, desde a seleção dos materiais, métodos de execução até o acompanhamento pós-execução com o monitoramento de seções teste em trechos experimentais, surgiu em 2009 o Programa Rede Temática de Asfalto da Petrobras.

A Rede Temática tem como finalidade projetar, construir e monitorar sistematicamente um conjunto de pistas experimentais em várias regiões do Brasil, visando a criação de um banco de dados de materiais, tecnologias e desempenho de pavimentos asfálticos. A médio e longo prazo, pretende-se correlacionar essas informações coletadas em campo com os ensaios laboratoriais de modo a desenvolver um Sistema de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos (SDIMPA), criando assim um método brasileiro para dimensionamento que leve em consideração aspectos mecânicos dos materiais empregados e também condições climáticas e de tráfego as quais o pavimento for submetido.

É preciso determinar fatores laboratório-campo, que permitam empregar com confiabilidade os resultados de ensaios laboratoriais e de análises mecânicas na previsão de vida de fadiga de camadas asfálticas, de evolução de deformações permanentes e de irregularidade longitudinal, contemplando ao mesmo tempo aspectos funcionais como a serventia e a segurança.

Tal determinação implica a monitoração sistemática da evolução das condições estruturais e funcionais de pavimentos com materiais, espessuras de camadas e características mecânicas perfeitamente conhecidas, solicitados por tráfego medido com a maior acurácia possível, considerando ainda as condições ambientais circundantes (clima e condições de drenagem).

Conforme dados apresentados anteriormente, em países como Estados Unidos que investem cerca de US\$ 30 bilhões por ano na construção, manutenção e reparação de pavimentos rodoviários, o programa LTPP, o mais abrangente da América do Norte, aborda as melhores maneiras de alocar e aplicar este investimento anualmente.

Através de programa semelhante na Austrália, a comissão de produtividade identificou que uma melhoria de 5% no setor rodoviário poderia aumentar o PIB da nação em cerca de US\$ 2,4 bilhões, dados de 2007 segundo site oficial da agência.

No Brasil, nota-se a necessidade de implantação de programas de monitoramento do comportamento da malha rodoviária (incentivo e ampliação dos já existentes), a exemplo do que ocorre em países como EUA e Austrália. A formação de um banco de dados nacional permitirá, através do monitoramento de diversos trechos experimentais, em diversas regiões, contemplando a diversidade de materiais e condições climáticas, a determinação experimental de fatores que correlacionem resultados de ensaios em laboratório em solos, agregados e misturas, em modelos de previsões de desempenho real dos pavimentos.

Neste sentido, o Projeto Rede Temática de Asfalto, segundo Leite (2013), tem em seu banco de dados, 50 trechos referentes ao Projeto Fundação e 25 trechos experimentais construídos e monitorados em diversos Estados brasileiros, envolvendo a parceria da Petrobras com diversas Universidades e Instituições de Pesquisa e Desenvolvimento. O projeto pretende até o ano de 2017 ampliar seu cadastro de dados no Sistema da Rede Temática de Asfalto (SRTA) com mais 55 trechos experimentais e lançar o *software* a versão SisPav Beta com três níveis de análise, conforme Figura 17 a seguir.

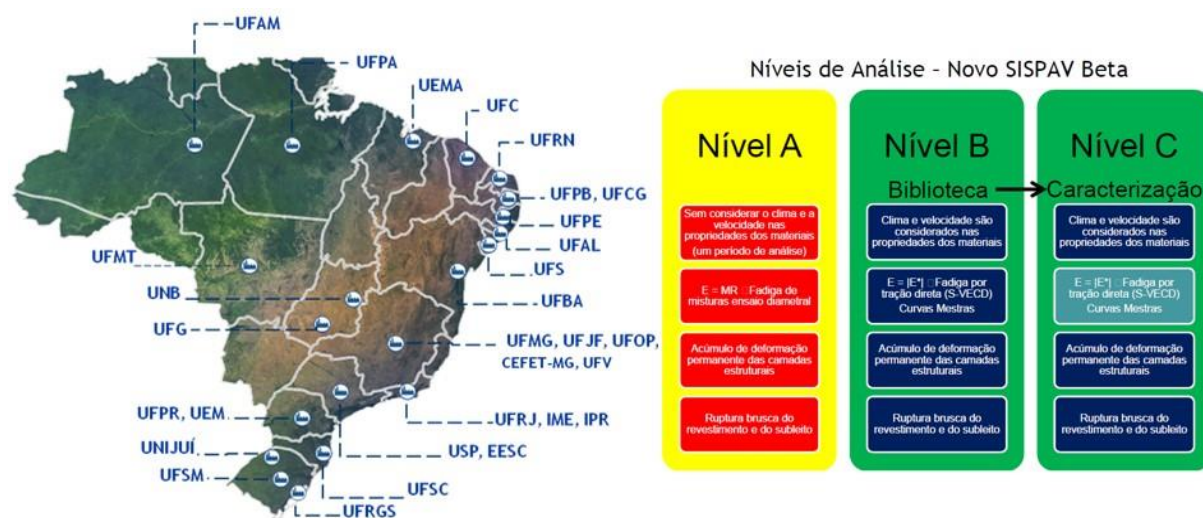


Figura 17 – Abrangência do projeto Rede Temática de Asfalto e níveis de análise propostos (NASCIMENTO, 2014)

Contextualiza-se desta forma a presente pesquisa como parte integrante do Programa de Monitoramento da Rede Temática de Asfalto que visa o acompanhamento de seções monitoradas nas mais distintas regiões do país para estabelecer modelos de previsão de desempenho de pavimentos levando em consideração as particularidades de materiais, clima e métodos construtivos. Servindo posteriormente este banco de dados de desempenho para o desenvolvimento de um método de dimensionamento mais racional. Apresenta-se a seguir a importância dos modelos de previsão de desempenho de pavimentos com um breve resumo dos principais modelos desenvolvidos em âmbito nacional.

2.4.4 Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho

Entende-se por desempenho de um pavimento o grau com que o mesmo atende as funções que lhe são impostas ao longo de sua vida de serviço. A interpretação do desempenho oferecido por um determinado pavimento busca, identificar de maneira objetiva a sua condição atual e futura, possibilitando definir de forma racional as ações que compõe um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP).

Nesse sentido, diversos órgãos rodoviários e centros de pesquisa tem, ao longo do tempo, desenvolvido uma grande variedade de modelos de previsão de desempenho para utilização em atividades de gerenciamento de pavimentos. De acordo com Rodrigues (1997), a engenharia de pavimentação moderna envolve a concepção, o projeto, a construção, a manutenção e a avaliação de pavimentos dentro de fatores e condicionantes técnicos, econômicos, operacionais e sociais. Sendo, neste contexto mais amplo, fundamental, para uma otimização de fato, a aplicação de modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos, cuja tecnologia se encontra hoje em condições operacionais.

Conforme mencionado anteriormente, nos últimos anos o tráfego rodoviário brasileiro tem crescido de forma significativa, tanto em relação à frota de veículos comerciais quanto ao volume de mercadoria transportada, uma tendência que acompanha o desenvolvimento econômico do País. Diante deste contexto, a oferta e a qualidade da infraestrutura de transporte existente no país é fator primordial, não basta apenas investir na construção de novos pavimentos, mas também recuperar e manter a qualidade dos pavimentos existentes, que em grande parte encontra-se em más condições de trafegabilidade e segurança.

Frente à condição apresentada, torna-se cada vez mais necessário, ao projetar um pavimento, prever seu desempenho face às solicitações às quais o mesmo será submetido durante a sua vida de projeto. A previsão do desempenho dos pavimentos, atividade de fundamental importância para sua manutenção e restauração, pressupõe o acurado conhecimento da composição de veículos de carga que solicitarão essas estruturas.

Os pavimentos são dimensionados, segundo o DNIT (2006b), para durarem determinados períodos. Em tais períodos, designados por ciclos de vida, o pavimento inicia numa condição ótima até alcançar uma condição ruim; a esse decréscimo de condição atribui-se a denominação de degradação. A modelagem do processo evolutivo da degradação oferecida por estruturas de pavimentos exige o entendimento claro de como os principais mecanismos de deterioração se originam e se desenvolvem sob a ação das cargas do tráfego e das variações climáticas.

Os modelos de desempenho são estabelecidos para prever a velocidade com que os valores dos parâmetros funcionais e estruturais dos pavimentos variam em função das solicitações do tráfego (principal fator analisado na presente pesquisa), ou das condições climáticas. Os mesmos são utilizados pelos SGP como ferramenta de auxílio na tomada de decisões, como por exemplo, para a escolha de ações de manutenção e reabilitação, para a determinação da data de

intervenção e para a seleção de projetos prioritários. Segundo definições do FHWA (2006), o uso dos modelos de previsão possibilita os seguintes aspectos:

- Determinar a vida restante do pavimento, quando há conhecimento da condição limite;
- Otimizar a combinação de projetos, estratégias e o tempo para concluir as metas;
- Avaliar os impactos temporais de vários cenários elencados;
- Promover o “feedback” para o processo de projeto do pavimento; e
- Auxiliar na estimativa dos custos do ciclo-de-vida do pavimento.

Os modelos de previsão podem ser elaborados, individualmente, para cada parâmetro de desempenho, ou para um índice de condição (envolvendo todos os mecanismos de deterioração). O nível de complexidade dos modelos pode ser de livre escolha, ficando a cargo do gestor do sistema. O primeiro passo para a sua elaboração está em determinar a forma desejada para o modelo. Existem dois tipos de modelos que podem ser elaborados para se prever desempenho de pavimentos (FHWA, 2006; Pedrosa, 2002). São eles:

- **Determinístico** → modelo no qual o estado de um sistema é definido por causas que se podem determinar e identificar o descrito adequadamente sem recorrer a elementos probabilísticos. É o modelo matemático que determina os resultados, exatamente, a partir de condições iniciais. Utiliza-se de regressão para fornecer um único valor de um parâmetro (variável dependente) a partir de uma ou mais variáveis (independentes). Algumas formas matemáticas para modelos determinísticos podem ser observadas na Figura 18.

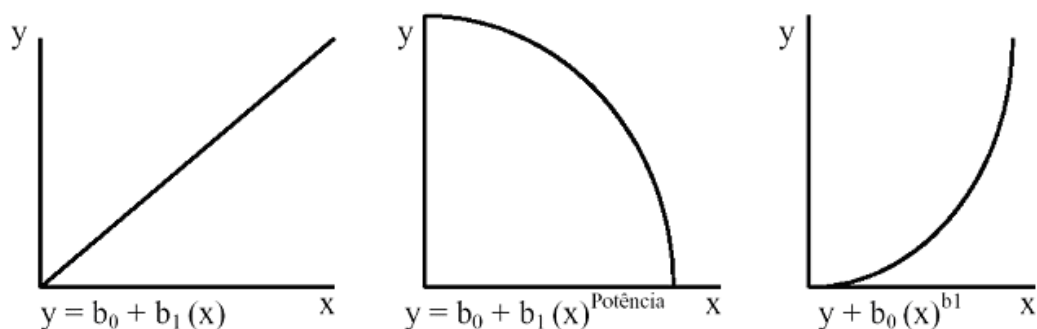


Figura 18- Formas dos modelos determinísticos

Os modelos determinísticos podem ser subdivididos nos seguintes modelos:

- *Modelos de desempenho estrutural*: preveem o surgimento e a propagação dos defeitos produzidos pela repetição de cargas de tráfego / tempo;
 - *Modelos de desempenho funcional*: preveem a queda do índice de serventia e do coeficiente de atrito da superfície com a repetição de cargas de tráfego / tempo;
 - *Modelos de degradação*: são derivados de um dos dois anteriores e utilizam uma função de degradação, que é um indicador normalizado de defeitos ou de queda do índice de serventia.
- **Probabilístico** → fornece o alcance de valores de um parâmetro, o qual é baseado em matrizes de transição probabilística que estimam a probabilidade de seções de pavimentos mudarem de uma condição para outra. Pode ser subdividido em:
 - *Curvas de sobrevivência*: é um gráfico de probabilidade x tempo e representa a porcentagem de pavimentos que permanecem em serviço após um certo número de anos (ou de passagens do eixo-padrão) sem requererem um grande investimento em conservação ou sem necessitarem ser restaurados. Este gráfico pode ser elaborado a partir do histórico de manutenção de pavimentos da rede;
 - *Modelos markovianos*: utilizam a chamada “Matriz de Transição”, que expressa a probabilidade de um grupo de pavimentos com idades semelhantes e sujeitos ao mesmo nível de tráfego passe de um estado de degradação ou índice de serventia para outro, dentro de um período de tempo especificado. Este processo é dito estacionário, pois a mudança no estado de serventia do pavimento não dependerá do tempo (com valores estatísticos invariáveis), não sendo adequado para planejamento da rede (os fenômenos naturais não se comportam desta forma); e
 - *Modelos semi-markovianos*: são idênticos aos modelos markovianos, com a diferença de que considera que o processo seja estacionário apenas durante incrementos de tempo.

O FHWA (2006) classifica os tipos de modelos de previsão de desempenho e variáveis utilizadas pelos níveis de gerência de pavimentos (nacional, estadual ou projeto) de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 - Tipos de modelos de desempenho (FHWA, 2006).

Nível de Gerência	Determinístico				Probabilístico		
	Resposta Primária	Estrutural	Funcional	Deterioração	Curvas de Sobrevivência	Modelos de Processo de Transição	
	Deflexão	Degradação	PSI	Carga Equivalente		Markov	Semi-Markov
	Tensão	Condição do Pavimento	Segurança				
	Deformação						
Nacional				X	X	X	X
Estadual		X	X	X	X	X	X
Projeto	X	X	X	X			

Quanto a sua natureza, os modelos de previsão de desempenho ainda podem ser subdivididos, conforme descrito por Haas et al., 1994:

- **Puramente Mecanísticos** → modelos baseados em parâmetros de respostas estruturais, como tensão, deformação e deflexão. Esses modelos não são considerados modelos de desempenho;
- **Mecanístico-Empíricos** → onde o parâmetro de resposta estrutural é relacionado à deterioração estrutural ou funcional medida, sendo obtida através de equações de regressão. Esses tipos de modelo são os mais utilizados para fazer a previsão de desempenho de pavimentos;
- **Empíricos ou de Regressão** → onde a variável dependente de deterioração estrutural ou funcional, são relacionadas a uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, aplicações de carga por eixo, propriedades e espessuras das camadas do pavimento, fatores ambientais e suas interações; e
- **Subjetivo** → onde a experiência de engenheiros é formalizada através de processos de transição, como o processo de Markov, que permite a obtenção de modelos de desempenho mesmo sem série histórica de dados. Este tipo de modelo é um caminho alternativo para o desenvolvimento preliminar de modelos de desempenho, onde a base de dados requerida não é extensa e obtida em etapas de projeto.

Existem quatro critérios que devem ser levados em consideração para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho (FHWA, 2006):

- Um banco de dados adequado às condições e interesses do sistema;
- A inclusão de todas as variáveis importantes que afetem o desempenho;
- Uma formulação funcional adequada do modelo; e
- O critério estatístico adequado de acordo com a precisão requerida para o modelo.

Com uma consistente base de dados os modelos de previsão de desempenho têm uma boa aplicabilidade à pavimentação, principalmente quando válidos para regiões específicas. Eles devem ser desenvolvidos para famílias de pavimentos com características comuns, tais como: tipo de superfície, classificação funcional, níveis de tráfego, localização geográfica e clima. A técnica de se separar os pavimentos em famílias é uma boa opção quando a quantidade de dados não é significativa (FHWA, 2006).

Apesar de serem muito utilizados, os modelos determinísticos fornecem vários erros de resultados por não levarem em consideração variações regionais que ocorrem nos pavimentos. Essa situação só é contornável com uma calibração destes modelos, o que requer um extenso banco de dados (FHWA, 2006). Mesmo se bem aplicável à gerência de pavimentos em nível de rede, os modelos probabilísticos apresentam grande desvantagem por não mostrarem como as variáveis que interferem no desempenho do pavimento estão contribuindo para isso.

Deve-se utilizar de ferramentas estatísticas para avaliar se os resultados fornecidos pelos modelos são confiáveis. A verificação da correlação entre variáveis independentes contidas nos modelos de desempenho em nível de rede é um bom indicador de sua capacidade de acerto. Os modelos determinísticos devem considerar o valor dos coeficientes de determinação (R^2) para cada uma de suas variáveis independentes. Quanto mais se aproximar do valor 1 (um), maior a correlação entre as variáveis dependentes e independentes.

A Tabela 12 apresenta o que se espera dos parâmetros de regressão para modelos elaborados em nível de rede e projeto.

Tabela 12 - Expectativa dos parâmetros de correlação (FHWA, 2006)

Nível de Análise do SGP	R²	REMQP	Tamanho da Amostra	Número de Variáveis Independentes
Nível de Rede	Valores de médio para baixo	Valores médios para altos	Grande	Mais de uma
Nível de Projeto	Valores altos	Valores baixos	Pequena	Uma

Obs.: R² → coeficiente de determinação; e REMQP (Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual) → erro médio quadrado, que é o desvio padrão do valor determinado pelo modelo.

O desenvolvimento dos modelos de previsão de desempenho se dá através de campanhas de coleta de dados realizados em programas de monitoramento das condições do pavimento (funcionais e estruturais) durante significativos períodos de monitoramento (*LTPP*), conforme os mencionados no item anterior.

Informações confiáveis quanto à idade do pavimento, histórico de manutenção, geometria da rodovia, condições climáticas, histórico e intensidade do tráfego atuante, características estruturais e propriedades dos materiais são cruciais para que essa comparação tenha significado. Esses modelos de desempenho devem retratar, da melhor forma possível, as condições locais, uma vez que cada região apresenta características distintas como tráfego, clima, capacidade de suporte do subleito, tipo de materiais empregados na construção, além de diferentes técnicas e controles construtivos.

Existem os modelos ditos como “universais”, já consagrados, como por exemplo os modelos do HDM-4, porém a grande problema de aplicar estes modelos está na dificuldade de sua calibração para as características regionais dos trechos que se pretende analisar.

Segundo Albuquerque (2007) os modelos mais empregados acabam por desprezar as características climáticas em suas equações, o que acaba acarretando falhas nas previsões de desempenho. Neste quesito merecem destaque a utilização ou desenvolvimento de modelos regionalizados.

No Brasil, a implementação do primeiro Sistema de Gerência de Pavimentos ocorreu no início da década de 80, pelo DNER, para a malha rodoviária federal. Desde então, vários estudos foram publicados no país, abordando a gerência de pavimentos ou assuntos relacionados a ela.

Queiroz (1981), a partir da base de dados da Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), desenvolvida pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), estabeleceu modelos de previsão de desempenho mediante modelos empírico-mecanísticos para a previsão da irregularidade longitudinal e do trincamento de pavimentos no Brasil.

De forma semelhante, Paterson (1987) desenvolveu equações de previsão da deterioração de pavimentos através da análise estatística dos dados coletados para a PICR, sendo algumas dessas equações estruturadas a partir de conceitos mecanísticos.

Desde então, vários estudos foram publicados no país, abordando a gerência de pavimentos ou assuntos relacionados a ela, no que diz respeito aos modelos de desempenho, além dos trabalhos já citados desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987), de repercussão internacional, que foram, com algumas adaptações, incorporados ao sistema HDM, outros trabalhos de grande relevância foram os realizados por Marcon (1996), Basílio (2002) e Yshiba (2003), para, respectivamente, os Estados de Santa Catarina, Paraná e Goiás.

No nordeste brasileiro, Benevides (2006) e Albuquerque (2007) também realizaram estudos para a elaboração de modelos de previsão de desempenho para os Estados do Ceará e Paraíba. Nakahara (2005) elaborou modelos de previsão para rodovias urbanas de intenso tráfego pesado, na cidade de São Paulo. Em pesquisa realizada no Sul, Lerch (2003) desenvolveu modelos avaliando a redução da irregularidade em pavimentos do Rio Grande do Sul.

Os modelos de previsão de desempenho de pavimentos são ferramentas fundamentais em um Sistema de Gerência de Pavimento, tanto em nível de rede quanto de projeto, pois com eles pode-se determinar a condição futura dos pavimentos e prever investimentos. Estes modelos são instrumentos tecnológicos essenciais para a análise de estratégias alternativas de projetos de pavimentos (Queiroz, 1984).

Segundo Basílio (2002) os modelos de previsão de desempenho são estabelecidos para prever a velocidade com que os valores dos parâmetros funcionais e estruturais variam em função das solicitações do tráfego ou das condições climáticas às quais está submetido o pavimento.

Os modelos de previsão podem ser elaborados, individualmente, para cada parâmetro de desempenho, ou para um índice de condição (envolvendo todos os mecanismos de deterioração). Os melhores modelos de previsão de desempenho de pavimentos são aqueles

desenvolvidos diretamente a partir de dados de campo sistematicamente coletados e analisados, sendo que estes dados de observação de pavimentos restringem o uso do modelo ao ambiente de avaliação (Paterson, 1987).

Na Tabela 13 a seguir apresenta-se resumidamente alguns dos principais modelos de previsão de desempenho desenvolvidos em âmbito nacional.

Tabela 13 - Principais modelos de previsão de desempenho desenvolvidos no Brasil

MODELOS	ANO	PARÂMETROS	UF
Queiroz	1981	Irregularidade longitudinal	GO, MG, SP, DF (PICR - GEIPOT)
Paterson	1987	Trincamento, Irregularidade e Afundamento de trilha de roda	GO, MG, SP, DF (PICR - GEIPOT)
Pinto	1991	Desempenho à fadiga	RJ
Marcon	1996	Irregularidade longitudinal, Deflexões máximas médias, Índice de gravidade global e Afundamento de trilha de roda	SC
Basílio	2002	Deflexões, Trincamento, Irregularidade Longitudinal e Afundamento de trilha de roda	GO
Lerch	2003	Irregularidade longitudinal	RS
Yshiba	2003	Deflexão e Irregularidade Longitudinal	PR
Nakahara	2005	Irregularidade longitudinal, início e evolução de trincamento	SP ¹
Benevides	2006	Irregularidade longitudinal	CE ²
Albuquerque	2007	Deflexões, Irregularidade Longitudinal, Índice de gravidade global	PB, CE
Franco	2007	Tensão de tração na camada asfáltica, Desempenho à fadiga	RJ ³
Vitorelo	2008	Irregularidade longitudinal e Afundamento de trilha de roda, Deflexões	RS

Nota: ¹ Via Urbana São Paulo; ² Região Metropolitana de Fortaleza; ³ Banco de dados UFRJ

Os avanços nas tecnologias de modelagem e nas capacidades computacionais nos últimos anos, juntamente com iniciativas de programas de avaliação de desempenho de pavimentos, como o *Strategic Highway Research Program (SHRP)* e o *Long Term Pavement Performance (LTPP)* já mencionados anteriormente, levam a metodologias de dimensionamento e análises de desempenho de pavimentos mais precisas.

Atualmente, os Sistemas de Gerência de Pavimentos contam, também, com programas computacionais para a realização de suas análises. Pode-se citar, como exemplo, o HDM-4/5 (*Highway Development and Management*), desenvolvido pelo Banco Mundial.

Esse programa utiliza modelos de desempenho para avaliar técnica e economicamente projetos de rodovias, preparar programas de investimentos rodoviários e analisar diversas alternativas de manutenção e reabilitação, além de ser utilizado pelo Banco Mundial para a análise de concessão de financiamentos a organismos rodoviários.

Neste sentido, avanços nos métodos de caracterização dos materiais que compõe a estrutura do pavimento que são baseados em propriedades fundamentais de engenharia para determinar o estado de tensões e deformações conduzem a análises mais realistas do comportamento da estrutura do pavimento frente as solicitações atuantes.

De grande importância no projeto de pavimentos novos e posteriormente na gerência destes pavimentos são as características do tráfego. O conhecimento e a definição das reais cargas que trafegam nas rodovias é de suma importância para prever o seu desempenho.

Conforme já relatado e enfatizado em itens anteriores, o tráfego com cargas acima dos limites legais pelas rodovias brasileiras é uma realidade que afeta significativamente a vida útil da estrutura projetadas. O conhecimento do real espectro de cargas torna-se neste contexto essencial para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho e uma adequada gerência dos pavimentos.

A previsão de desempenho, segue basicamente o fluxograma a seguir (Figura 19), onde após definidos e calibrados os modelos, realiza-se uma ponderação dos efeitos das solicitações mecânicas externas (clima e tráfego) às quais as propriedades intrínsecas do pavimento devem se opor, e o pavimento dessa forma resistir de maneira satisfatória a garantir seus níveis de qualidade funcional e estrutural.

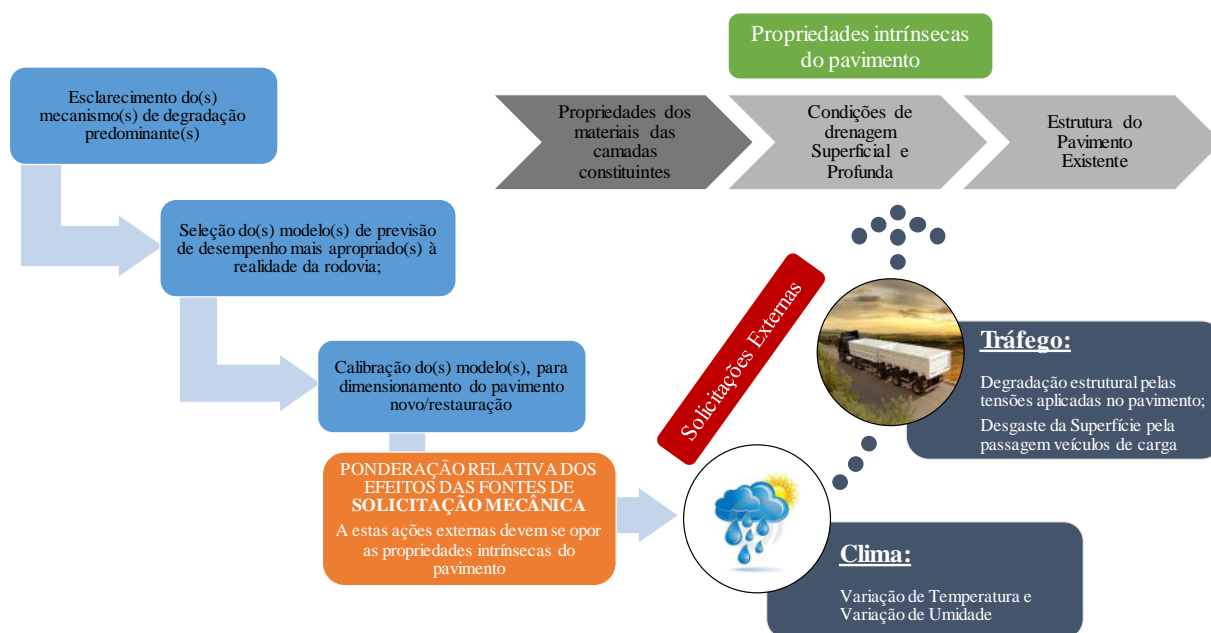


Figura 19 – Previsão de desempenho de pavimentos rodoviários

2.4.5 Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho

Diante do contexto exposto no âmbito rodoviário em relação ao transporte de cargas, sistemas de fiscalização e monitoramento de desempenho de pavimentos a presente pesquisa visa, através do acompanhamento da construção e pós-execução de trechos monitorados e análise do espectro de cargas, verificar a influência principalmente do tráfego nos parâmetros de desempenho funcional e estrutural de pavimentos flexíveis.

Sabe-se que projetos de pavimentos rodoviários diferem em muitos aspectos importantes dos demais tipos de obra realizados no âmbito da engenharia civil e geotécnica. Os pavimentos são estruturas que se deterioram gradualmente ao longo dos anos. Diversos fatores incidem sobre os danos na estrutura dos pavimentos tais como: as solicitações das cargas oriundas do tráfego (volume e nível de carregamento), a qualidade dos materiais e o efeito do clima, principalmente da temperatura e da umidade.

O dimensionamento de um pavimento consiste na especificação das características dos materiais e o cálculo das espessuras das camadas de forma que as mesmas apresentem condições satisfatórias para resistir às cargas resultantes da passagem dos veículos e transmiti-las de forma distribuída ao subleito, sem que o conjunto sofra ruptura, deformações apreciáveis ou desgaste superficial excessivo, ou seja, limitar durante a vida de projeto a ocorrência de degradações.

De forma resumida, o dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e/ou verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil do mesmo corresponda a um certo número projetado de solicitações de carga. É necessário observar que, o estudo dos pavimentos deve considerar e se basear na análise dos materiais disponíveis, seu comportamento individual e em conjunto nas misturas que compõe as camadas, sob a ação de distintos carregamentos e sob a influência das mais variadas condições climáticas e ambientais.

O projetista não possui o conhecimento exato destes fatores e, na verdade, elabora o dimensionamento com os parâmetros médios ou característicos, com um grau de risco estatístico adotado como aceitável. O estudo dos pavimentos é caracterizado pela natureza complexa das variáveis de projeto. Em resumo, deve-se observar que, o estudo dos pavimentos deve considerar e se basear na análise dos solos e materiais naturais disponíveis, seu comportamento individual e em conjunto nas misturas, sob a ação dos vários carregamentos e sob a influência das mais variadas condições climáticas e ambientais.

O estudo dos pavimentos envolve, portanto, a análise de diferentes variáveis interligadas entre si e de naturezas distintas (subleito, materiais, tráfego e condições climáticas). Na presente pesquisa estas variáveis foram acompanhadas nas etapas do projeto Rede Temática, ou seja, Pré-Execução (definição, caracterização dos materiais que compõe a estrutura do pavimento), Execução (acompanhamento das técnicas e controle tecnológico das camadas executadas) e Pós-Execução (avaliação dos parâmetros funcionais e estruturais ao longo da vida útil).

Tanto na fase de projeto quanto na gerência de pavimentos, a caracterização do tráfego solicitante é uma das maiores dificuldades. O conhecimento das cargas transportadas pelos veículos comerciais acaba sendo uma das principais incertezas para uma adequada avaliação das alternativas de projeto e de tomada de decisão. Neste contexto, várias simplificações acabam sendo realizadas.

Uma destas simplificações está relacionada à magnitude das cargas, onde na grande maioria dos casos, não dispondo de dados sobre os reais carregamentos da frota, adotam-se os carregamentos máximos dos eixos ou grupos de eixos, conforme especificado pela legislação. Considerando as deficiências quanto à fiscalização das cargas nas rodovias brasileiras e o crescente aumento do número de veículos comerciais e das cargas transportadas pelo modal rodoviário esta simplificação acaba prejudicando substancialmente o dimensionamento de pavimentos novos ou planos de manutenção e restauração de rodovias degradadas.

A realização de estudos e a consideração do espectro de cargas da frota circulante, ao invés do conceito de eixo padrão rodoviário, seria a alternativa mais coerente a ser empregada.

Em função destas dificuldades apresentadas, a pesquisa WIM realizada em conjunto com a presente tese, traz avanços significativos na caracterização da frota e seus carregamentos através da fiscalização de forma continuada da frota solicitante que trafegam nos trechos monitorados da rodovia BR-290/RS.

A estrutura de um dado pavimento deve suportar as cargas oriundas do tráfego, nas condições climáticas locais, de maneira a oferecer o desempenho desejável para as suas funções de conforto ao rolamento e segurança ao usuário.

A engenharia rodoviária busca gradativamente um entendimento mais analítico do problema e tentando, com isso, reduzir a parcela do empirismo que é inevitável no atual estado-da-arte. Além disso, relacionam-se as tensões de tração na base da camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento ou as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de trilha de roda.

No entanto, em geral, tais teorias não modelam diversos fatores que deveriam ser observados no dimensionamento de um sistema em camadas, cujas propriedades variam com o tempo e com as condições ambientais, e que tem a deterioração acumulada com a passagem das cargas variáveis em intensidade, distribuição e velocidade.

Assim, o último passo no processo de dimensionamento acaba por ter uma parcela empírica, com a aplicação dos fatores de calibração campo-laboratório sobre os modelos desenvolvidos em laboratório (MOTTA, 1991).

A necessidade da modelagem mecanística-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, sobre cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, e considerar, também, os efeitos das condições ambientais e principalmente das reais cargas de tráfego, condições diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos foram desenvolvidos.

Nos últimos anos o estudo da pavimentação vem experimentando um grande avanço tecnológico, tanto no Brasil quanto no exterior, devido em parte à pesquisa e ao desenvolvimento de diversos métodos de dimensionamento de pavimentos com base em estudos acadêmicos e observações de dados de comportamento de pistas experimentais.

Nota-se uma tendência evidente da evolução dos projetos de pavimentos no Brasil e no mundo. De sistemas mais rudimentares como o romano, migramos para projetos empíricos baseados em observações aos projetos empírico-mecanísticos.

Nessa transição a ser percorrida, passa-se gradualmente de uma metodologia de dimensionamento totalmente empírica onde se empregam modelos fenomenológicos obtidos a partir de observações de campo; passando pelos métodos mecanístico-empírico nos quais tem destaque o uso de modelos de desempenho empíricos; e finalmente passando para um dimensionamento totalmente Mecanístico através de métodos sofisticados para cálculos dos esforços, com modelos de desempenho mecanicistas.

Resumidamente, a Figura 20 apresenta essa evolução, com os conceitos de dimensionamento de pavimentos e estágio atual, segundo Nascimento (2014).

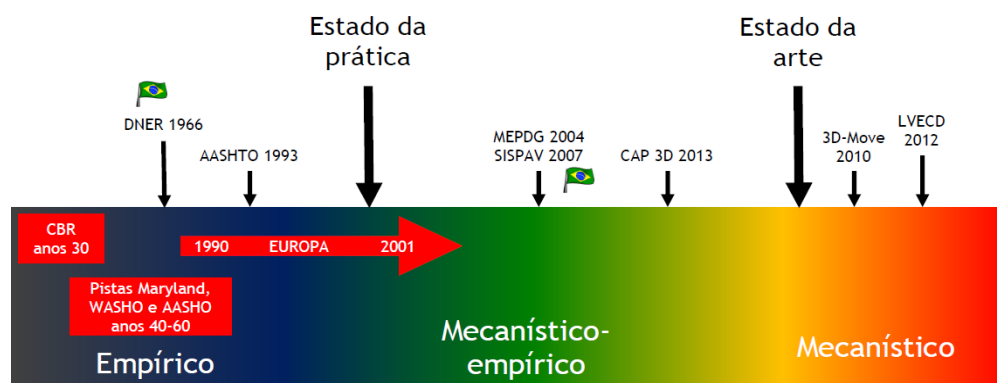


Figura 20 – Conceitos de projetos de pavimentos e seu estágio atual (NASCIMENTO, 2014)

Stephen Brown, professor da Universidade de Nottingham, ilustrava o estágio no qual se encontravam os projetos de pavimentos no mundo, demonstrando que o estado-da-prática encontra-se em uma fase transitória entre os projetos empíricos e os mecanístico-empíricos e menciona a dificuldade para migrar para projetos puramente mecanísticos.

Segundo Brown (2008, *apud* BRITO, 2009), chegar aos modelos mecanísticos funcionais trata-se de uma tarefa ainda incerta de sucesso, uma vez que a variabilidade de materiais, clima, tráfego, etc., pode levar este nível de análise a um patamar quase inviável. No entanto, é de consenso que a lógica dos projetos mecanísticos é o caminho para o futuro e neles já são concentradas as pesquisas e trabalhos vindouros.

Atualmente, segundo KIM (*apud* NASCIMENTO, 2014), nos EUA o estado da arte em análises de pavimentos já é baseado em modelos de previsão de desempenho mecanicistas implementados em softwares que incluem análises considerando parâmetros viscoelásticos, como LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses*) através da

realização de análises tridimensionais, com simulações de carregamentos distintos e respectivas respostas de desempenho do pavimento em razoável tempo computacional. As análises dos resultados podem ser expressas ao longo da vida útil do pavimento, bem como termos de trincamento por fadiga (*botton-up & top-down*) e deformações permanentes.

Estas evoluções nos métodos de análise trazem grandes evoluções para a pavimentação, principalmente em ambiente laboratorial, porém, não pode-se deixar de lado as considerações relacionadas às solicitações de tráfego, um carregamento dinâmico e com um nível variado de cargas (inclusive sobrecargas).

Muitas destas análises e métodos, devido a sua complexidade, ainda empregam um conceito simplificado do carregamento, fato este que acaba prejudicando uma aplicação mais prática à engenharia rodoviária na análise e dimensionamento de pavimentos com melhor qualidade que atendam as atuais necessidades de desempenho.

A implantação de sistemas mais eficientes de fiscalização de cargas e estudos para a definição dos reais carregamentos aos quais estão submetidas as estruturas analisadas vem a ser uma das soluções para melhoria da malha rodoviária nacional. Ao sanar-se as incertezas relacionadas aos carregamentos (estudos de espectros de cargas) e ao comportamento dos materiais, principalmente granulares e misturas asfálticos frente as ações dinâmicas e complexas das cargas (magnitude, velocidades, tempos de carregamento e temperatura ambiental) será possível melhorar o desempenho das estruturas evitando a ação prematura dos mecanismos de degradação.

Os maiores benefícios esperados através da evolução dos métodos estão relacionados ao uso de relações constitutivas que melhor representam as respostas dos materiais e dos pavimentos com eles construídos. Neste sentido, o emprego de modelos de desempenho com base mecanística desenvolvidos através das características de evolução de dano dos materiais, considerações mais apropriadas dos efeitos climáticos e das diferentes cargas do tráfego que solicitam a estrutura do pavimento (espectro de cargas) acarretam em uma melhoria da confiabilidade dos projetos desenvolvidos.

Um grande avanço realizado para o dimensionamento mecanístico-empírico está fortemente vinculado ao Guia da AASHTO 2002, que apenas, em 2008, passou à sua fase de término e homologação (MEPDG - DARWin ME - AASHTOWare).

O Guia de Projeto de Pavimentos Empírico-Mecanístico foi elaborado pelo Projeto NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) 1-37(A) e é largamente difundido como Guia AASHTO 2002. Este guia tem como objetivo ser um manual para projeto de pavimentos novos e reabilitações tanto para pavimentos flexíveis quanto rígidos. É um dos primeiros guias a incorporar de uma maneira mais abrangente o conceito mecanístico aos materiais, trazendo um novo horizonte para a engenharia rodoviária.

As equações empíricas recomendadas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) para o dimensionamento da estrutura de pavimentos são baseadas nos resultados de rodovias teste originais avaliadas pela AASHTO de 1958 a 1961, em Ottawa, Illinois. O estudo avaliou o desempenho de pavimentos de cimento de concreto Portland e de pavimentos de concreto asfáltico sob tráfego de particular magnitude e frequência.

Os avanços nas tecnologias de modelagem e nas capacidades computacionais nos últimos anos, juntamente com iniciativas de programas de avaliação de desempenho de pavimentos, como o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e o *Long Term Pavement Performance* (LTPP), levaram a metodologias de dimensionamento de pavimentos e análises de desempenho mais precisas.

Melhor caracterização de materiais que se baseiam em propriedades fundamentais de engenharia para determinar o estado de tensões e deformações, características do tráfego solicitante (um dos principais avanços desta tese), clima e avaliação de desempenho de seções de pavimento *in situ*, levaram a uma maior necessidade rumo a um método de dimensionamento mecanicista.

Associado ao novo guia de projetos, foi lançado um software que integra toda a metodologia proposta, inicialmente denominado de M-EPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) o software combina os elementos de modelagem mecânica e análise da performance de pavimentos em um grupo de condições de projeto. Conforme mencionado anteriormente, a versão atual do Guia de Dimensionamento é denominada de *AASHTOWare Pavement ME Design*, e será esta a versão empregada para as análises de desempenho realizadas no presente estudo.

O programa utiliza modelos numéricos para analisar dados de entrada do tráfego, clima e comportamento dos materiais de uma proposta estrutura, onde são estimados os danos acumulados durante toda a sua vida útil. O conceito de performance abrange estrutura, funcionalidade e segurança. Os prognósticos de desempenho são feitos em termos de defeitos

e qualidade ao rolamento. Os seguintes danos para pavimentos flexíveis são abordados: deformação permanente, trincamento por fadiga – ascendente e descendente – e ainda trincamento térmico.

A maneira como o software trabalha é uma forma integrativa de pequenos diferenciais de tempo e comportamento do pavimento. Ou seja, o ano é discretizado em intervalo de tempo da ordem de minutos e para cada um destes intervalos, é calculado o comportamento discretizado das camadas levando-se em consideração desde a variação de temperatura devido à irradiação solar até mesmo a distribuição horária de veículos para o ponto em análise. A filosofia de funcionamento do novo guia da AASHTO inclui as seguintes doutrinas:

- O guia aplica de uma forma abrangente o conhecimento já validado com tecnologias no estado-da-prática de análise e dimensionamento de pavimentos;
- O guia fornece aos projetistas a versatilidade de consideração de uma grande variedade de opções de materiais e projetos de pavimentação;
- O guia proporciona uma base de projeto equitativa da seleção do tipo de pavimento;
- O guia abrange tanto questões de projeto para pavimentos novos quanto reabilitações;

O guia compreende três níveis hierárquicos de dados de entrada para o projeto, de maneira a adequar a importância do projeto ao esforço a ele associado. Os níveis de entrada também permitem o uso de procedimentos que podem sofrer melhorias no futuro.

Um dos mais interessantes aspectos do guia é o seu acesso hierárquico, isto é, a consideração de diferentes níveis de precisão dos dados de entrada. O Nível 1, mais elevado, requer do engenheiro-projetista, dados mais acurados, isto é, ensaios dos materiais, pesagens de veículos, etc.

O Nível 2 requer ensaios, mas são permitidas correlações de dados, como por exemplo, módulo do subleito estimado através de correlação com o ensaio do CBR. Finalmente o Nível 3, baseado em valores fornecidos pelo programa, na falta de valores locais.

Uma das grandes dificuldades de fazer um dimensionamento no nível 1 é a consideração de todos os parâmetros de entrada. Dados sobre a mistura asfáltica, por exemplo, requerem toda a caracterização do ligante asfáltico assim como da mistura, exigindo dados como a curva mestre para determinação do módulo complexo e ângulo fase em uma varredura de frequências e

temperaturas. Desta forma, para projetos onde se tenha menor conhecimento ou controle, ou, ainda, maior variabilidade, das condições de contorno, um projeto em nível 3 pode absorver necessidades que não seriam possíveis de serem atendidas para um projeto em nível 1.

O nível de complexidade que o guia aborda o projeto demanda um enorme esforço para o seu detalhamento, porém permite um grande salto na avaliação de projeto e desempenho de pavimentos.

No caso da presente tese, para realizar as simulações de distintos cenários de carregamentos para análise de desempenho dos trechos experimentais considerando os dados de tráfego obtidos através da implantação do sistema de pesagem em movimento (Pesquisa WIM) sem considerar sobrecarga e considerando a sobrecarga dos veículos que trafegam na rodovia e por conseguinte a avaliação nos modelos de previsão, havia três opções em avaliação para o desenvolvimento do projeto:

- **Modelos simplificados** – como por exemplo aqueles do HDM-4, que são sobretudo feitos para rodovias de baixo volume de tráfego.
- **Modelos de média complexidade** – modelos como os do Guia da AASHTO, mas que seriam avaliados em interações simples com modelagem em planilha eletrônica.
- **Modelos de complexidade avançada** – como os desenvolvidos no software AASHTOWare Pavement ME Design da AASHTO que é a avaliação mais detalhada e recomendada para realização neste projeto já que as curvas de desempenho podem ser consideradas a partir do espectro de cargas rodantes – principal diferencial do WIM no projeto.

Assim, optou-se por utilizar o software da AASHTO, já que o mesmo estava disponível pois havia sido empregado no projeto de Pesquisa RDT Concepa – ANTT. Com isto, conseguiu-se aproveitar melhor a ferramenta para a maior quantidade de análises de pesquisa em tecnologia possível. A tela inicial do software é apresentada na Figura 21.

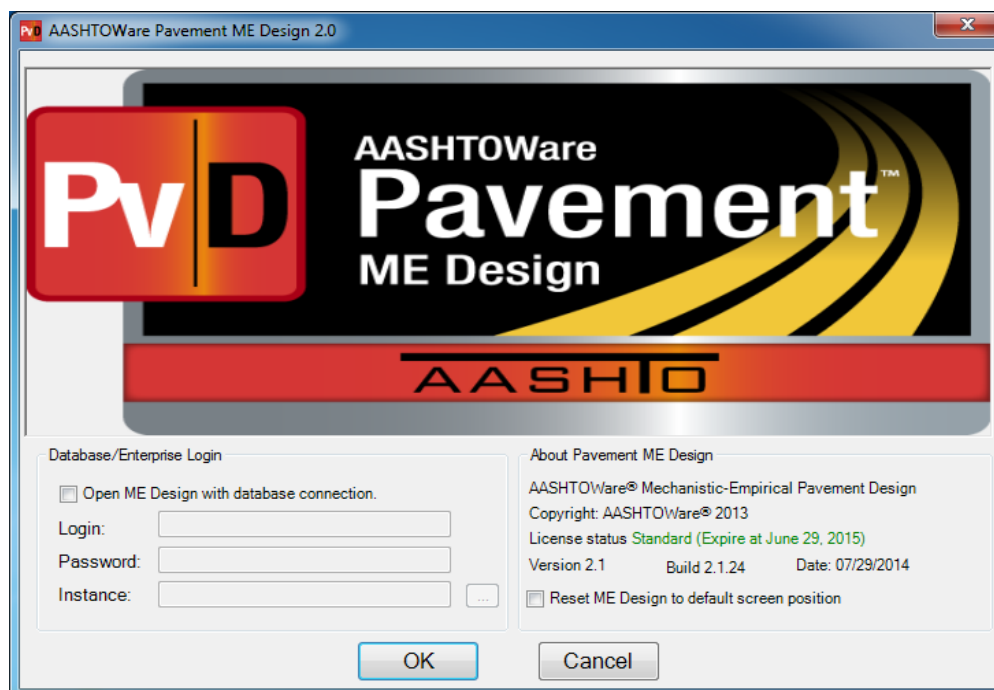


Figura 21 – AASHTOWare – Software empregado para análise e previsão de desempenho

Atualmente, a ferramenta mais completa para análises de desempenho de pavimentos flexíveis, e a ser empregada nesta pesquisa, é o software desenvolvido a partir do Guia da AASHTO 2004, produzido pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos no projeto NCHRP 1-37A. Este guia é hoje um dos mais modernos métodos de dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos rígidos e flexíveis.

O AASHTOWare e seu respectivo software permitem a análise e previsão do desempenho de diferentes tipos de pavimentos flexíveis e rígidos, utilizando modelos numéricos mecanístico-empíricos para analisar dados de tráfego, clima, materiais e estrutura proposta.

Os modelos estimam a acumulação de danos na vida de serviço. O conceito de desempenho de pavimentos aponta para o desempenho estrutural e funcional. O software, cujos modelos foram desenvolvidos através do Guia de Dimensionamento da AASHTO é como uma das ferramentas mais completas para previsão de desempenho de pavimentos, na atualidade.

Os dados de tráfego são um dos fatores chave na análise estrutural de pavimentos pelo AASHTOWare. Muitos dados de entrada são requeridos com relação ao tráfego. A abordagem através do ESAL utilizada nas versões anteriores do guia de dimensionamento de pavimentos, não é requerida. O guia passa a utilizar o espectro completo de carga por eixo, para cada tipo de eixo. Esse espectro é obtido através do processamento dos dados de pesagens de veículos em movimento WIM.

Uma vez que nem sempre se dispõem de recursos e condições para coletar informações detalhadas de tráfego, com o banco de dados obtidos a partir da coleta dos sensores WIM da presente pesquisa será possível a realização de análises da influência do tráfego (e eventuais sobrecargas) nos principais parâmetros de desempenho do pavimento.

Os indicadores de desempenho a serem considerados nas análises realizadas nesta pesquisa serão os apresentados na metodologia de pesquisa como evolução de IRI, evolução dos Trincamentos e evolução de ATR com o aumento da idade do pavimento, com aplicação de solicitação normal de tráfego e com consideração de sobrecarga dos veículos comerciais rodantes naquela rodovia. Relembrando, os principais mecanismos de degradação são oriundos principalmente das solicitações do tráfego e condições climáticas às quais o pavimento está exposto, reduzem seu desempenho funcional e estrutural.

Nesse trabalho, como o assunto se refere à caracterização do tráfego e seu consequente efeito nas condições do pavimento, as deteriorações consideradas de imediato são aquelas relacionadas às solicitações do tráfego: acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e o trincamento da camada asfáltica (desempenho estrutural).

Já o desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de fornecer uma superfície adequada em termos de qualidade de rolamento. A grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, na superfície do pavimento, que melhor se correlaciona com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança, a velocidade e a economia das viagens corresponde à irregularidade longitudinal.

Através dos modelos de previsão de desempenho pretende se chegar a uma estimativa bastante realista da evolução da condição do pavimento ao longo do tempo, com a solicitação da estrutura do pavimento pelas reais cargas que trafegam na rodovia, ou seja, o espectro de cargas da rodovia, com consideração dos eventuais excessos de carga.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Conforme descrito na introdução e nos objetivos da presente tese, a mesma se insere em dois importantes projetos de pesquisa. Um de abrangência nacional, denominado de Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto Petrobras/ANP, que consiste no acompanhamento sistemático de trechos monitorados construídos nas mais diversas regiões do Brasil com a finalidade de formação de um significativo banco de dados nacional de caracterização de materiais e desempenho de diferentes estruturas de pavimentos asfálticos nas mais distintas condições climáticas e de solicitação de tráfego. Estão apresentados e avaliados nesta tese os trechos implantados pelo LAPAV/UFRGS nas rodovias BR-290/RS e BR-448/RS.

O segundo projeto de pesquisa consiste em um monitoramento detalhado das cargas circulantes na rodovia BR-290/RS - *Freeway* através de dados obtidos por meio de um equipamento de pesagem dinâmica de alta velocidade (*High Speed Weigh-in-Motion* – HS-WIM). O projeto caracteriza-se pela implantação de um sistema de pesagem em movimento cujo principal objetivo, em sua primeira fase, é estudar a composição do espectro de cargas da frota de veículos comerciais rodantes em nossas rodovias, aspecto este que sempre vem sendo uma incógnita tanto nos projetos de rodovias novas quanto nos projetos e planos de manutenção e reabilitação de estruturas rodoviárias.

Após o término da primeira fase, com a determinação do espectro de cargas circulantes na rodovia, iniciou-se uma segunda etapa na qual se propôs a verificar qual o real impacto no pavimento ocasionado pelo espectro de cargas registrado. Esta fase foi intitulada como “Uso da tecnologia Weight-in-motion (WIM) para avaliação do desempenho de pavimentos asfálticos” e suas análises e conclusões fazem parte da presente tese.

Conforme será apresentado a seguir, o programa experimental da presente tese divide-se em etapas distintas, sendo elas, o acompanhamento de execução de trechos monitorados com realização de ensaios laboratório para controle de qualidade e posterior acompanhamento do desempenho do pavimento executado através de ensaios sistematicamente planejados (avaliação funcional e estrutural).

No segundo momento faz-se a avaliação das cargas circulantes através da classificação detalhada do tráfego, espectro de cargas obtido pelo WIM e dados de PPVM, e verificação de sua influência no desempenho dos trechos monitorados.

No decorrer do presente item serão apresentados de forma sucinta as etapas de planejamento, execução e posterior monitoramento de trechos monitorados como parte integrante do Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto Petrobras /ANP.

O acompanhamento da construção e monitoramento sistemático de trechos experimentais em várias regiões do Brasil, visa o desenvolvimento de um banco de dados nacional de caracterização de materiais e de desempenho de pavimentos que irá validar o desenvolvimento de um Método Brasileiro de Dimensionamento Mecânico de Pavimentos Asfálticos Novos e de Reforço.

As informações geradas alimentam um banco de dados único que ajudará a armazenar de forma padronizada as informações dos trechos monitorados. Este banco de dados compõe um sistema de informação especialmente desenvolvido pelo CENPES para este fim: Sistema da Rede Temática de Asfaltos, denominado de SRTA. A partir deste banco de dados poderá ser feita a análise dos resultados globais e será possível obter fator (es) campo – laboratório e modelos de desempenho para alimentar o método de dimensionamento.

O programa de implantação e monitoramento dos trechos experimentais é dividido em três etapas que devem ser cumpridas antes da construção (Pré- execução), durante a construção (Execução) e após a execução do trecho (Pós-execução), conforme apresentado esquematicamente na Figura 31.

Após estabelecimento de parcerias para acompanhamento da execução dos trechos a ser monitorados, todos os dados de caracterização de materiais empregados nas diversas camadas do pavimento e respectivos controles tecnológico da execução da estrutura alimentam o banco de dados do Sistema da Rede Temática de Asfaltos (SRTA).

Com a conclusão dos trechos, e imediatamente antes da abertura ao tráfego, avalia-se a condição inicial do trecho monitorado, após esta etapa, o acompanhamento das condições funcionais e estruturais é realizado periodicamente.

Conforme os dados dos acompanhamentos vão sendo coletados, os mesmos são adicionados ao Sistema da Rede Temática de Asfalto (SRTA) para serem inseridos no projeto em âmbito nacional que conta com a participação de dezenas de universidades e centros de pesquisa espalhados em todo o território nacional.

3.1 Apresentação dos trechos monitorados

Atualmente, através da parceria da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) o Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto conta com sete trechos monitorados, sendo quatro deles apresentados e analisados na presente tese. Os referidos trechos serão apresentados na sequência.

Estes trechos localizam-se na BR-448/RS (km15+600 ao 15+900 e km16+760 ao 17+060) e na BR 290/RS-*Freeway* (km14+400 ao 14+700 e km5+000 ao 5+500). Estes últimos apresentam períodos mais expressivos de monitoramento e em sua fase inicial fizeram parte do desenvolvimento da tese de doutorado de Mattos (2014).

As atividades relacionadas aos monitoramentos dos trechos encontram-se resumidos na descrição e Tabela 14 a seguir:

- a) **Trechos BR 290 Freeway** – Acompanhamento Pós-Execução encontra-se na avaliação correspondente ao mês 60 no Trecho 1 e correspondente ao mês 48 no Trecho 2, ou seja, completados o 4º e o 5º Ano de monitoramento;
- b) **Trechos BR 448/RS** – Acompanhamento Pós-Execução com avaliações de campo correspondentes ao mês 24 realizado até o presente momento, ou seja, acompanhamento de dois anos.

Tabela 14 – Atuais etapas de monitoramento dos trechos LAPAV/UFRGS

Trechos	Pré-Execução	Execução	Pós-Execução			
BR 290/RS	OK	OK	Mês 0 Mês 1	Mês 6 Mês 12	Mês 24 Mês 36	Mês 48 Mês 60
BR 448/RS	OK	OK	Mês 0 Mês 1	Mês 6 Mês 12	Mês 24 Mês 36	Mês 48 Mês 60

3.1.1 Rodovia BR-290/RS – Freeway

Os trechos da BR-290/RS encontram-se em fase mais avançada de monitoramento, com 4 e 5 anos de acompanhamento de desempenho. Tratam-se dos trechos, cujos resultados de caracterização de materiais, acompanhamento da construção e dados de monitoramento pós-construção nos anos iniciais são apresentados por Mattos (2014) em sua tese de doutorado

“Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul”.

Os referidos trechos estão localizados entre o km 14+700 e km 14+400 (Trecho 1) e entre o km 5+500 e km 5+000 (Trecho 2) da terceira faixa da pista sul (sentido Porto Alegre-Osório) da Rodovia BR-290/RS – Freeway, trecho sob concessão da Triunfo-Concepa.

A rodovia BR-290/RS, trecho Freeway localiza-se entre a região metropolitana de Porto Alegre e o município de Osório, próximo ao litoral gaúcho. A Freeway inicia em Osório (km 00+000) e termina em Porto Alegre (km 97+000 na ponte do Guaíba), conforme apresentado na Figura 26. Sua construção foi concluída em dezembro de 2014.

A localização da Rodovia e dos trechos experimentais está apresentada na Figura 22.

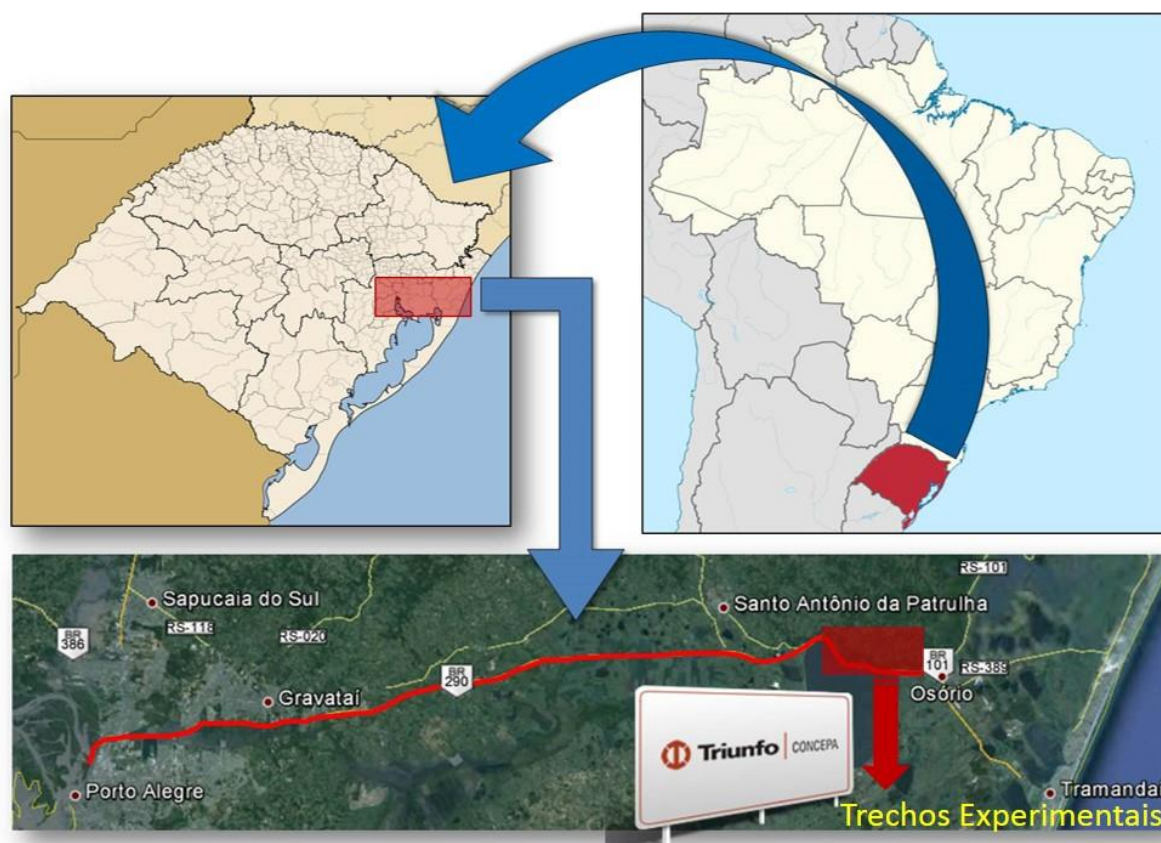


Figura 22 – Localização dos Trechos Experimentais UFRGS na BR-290/RS

No trecho em estudo, a rodovia conta com três faixas de tráfego por sentido com largura de 3,75m cada. A largura do acostamento externo é de 3,00m, enquanto a largura do acostamento interno é de 2,00m. A representação esquemática da pista Sul está representada na Figura 23.

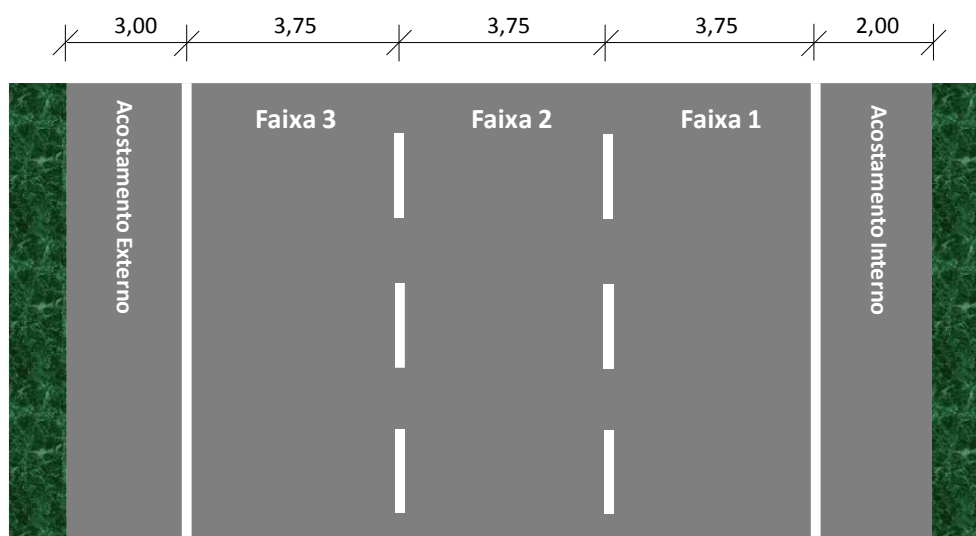


Figura 23 – Representação do layout da pista no decorrer dos trechos experimentais

A BR-290/RS apresenta uma estrutura típica do pavimento empregado na ampliação das faixas de rolamento no trecho Porto Alegre-Osório (Pista Sul), que consiste em uma camada de 60,0cm de espessura de Areia usada como reforço do subleito, 30,0cm de espessura de Macadame Seco na camada sub-base, 15,0cm de base de Brita Graduada e 8,0cm de espessura de revestimento com CA (Concreto Asfáltico), conforme apresentado na Figura 24.

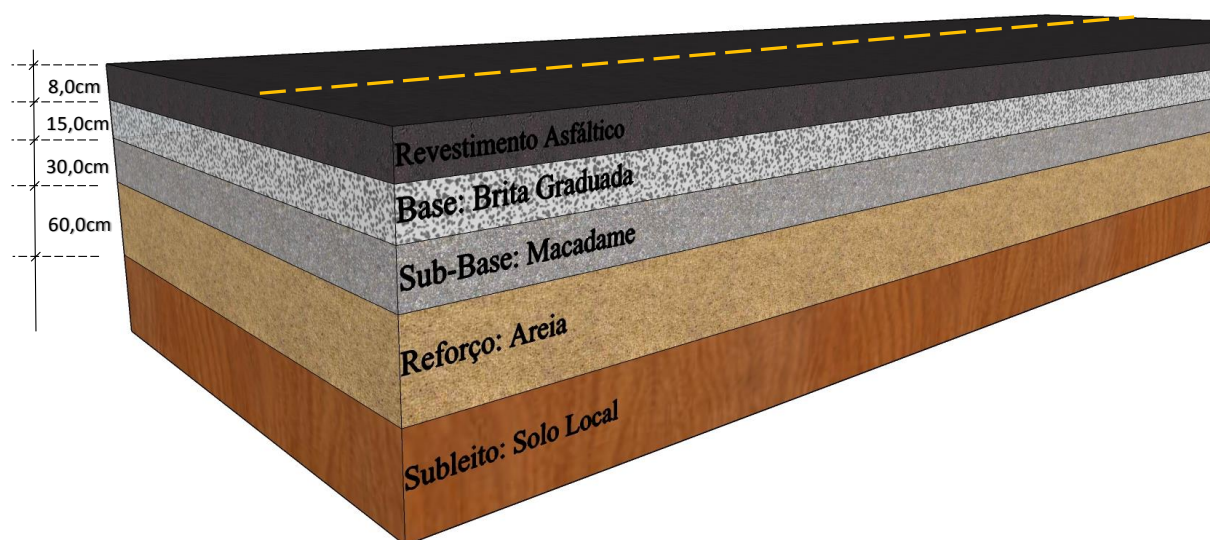


Figura 24 – Estrutura típica do pavimento dos trechos experimentais da BR 290/RS

Segundo Mattos (2014), a estrutura apresentada na Figura 24 caracteriza perfeitamente o Trecho 1. No entanto, o Trecho 2 difere na camada de reforço que ao invés de areia é composto por pedras devido à proximidade com a lagoa, mas no restante das camadas os materiais são da mesma origem e composição.

Os materiais pétreos empregados nas camadas de revestimento, base e sub-base são provenientes de rochas basálticas básicas, originárias da jazida próxima ao km 30+000 da mesma rodovia, no município de Santo Antônio da Patrulha.

As principais etapas de execução do pavimento descritas por Mattos (2014) estão apresentadas na Figura 25. O revestimento asfáltico dos dois trechos experimentais consiste de mistura asfáltica que se enquadra na Faixa C DNIT com emprego de ligante modificado poliméricamente (CAP 60/85-E).



Figura 25 – Principais etapas de execução dos trechos experimentais da BR-290/RS.
Adaptado de Mattos (2014)

3.1.2 BR 448/RS - Rodovia do Parque

A área de implantação da rodovia BR 448/RS encontra-se junto à região metropolitana de Porto Alegre, subdividida entre os municípios de Sapucaia do Sul, Esteio, Canoas e Porto Alegre. A BR 448/RS inicia em Sapucaia do Sul (km 00+000) e termina em Porto Alegre (km 22+340), trecho compreendido entre o entroncamento das rodovias BR-116/RS e RS-118/RS e o entroncamento com a BR-290/RS, conforme apresentado na Figura 26. Sua construção foi concluída em dezembro de 2014.

Os dois trechos experimentais foram estrategicamente definidos em função das soluções de projeto adotadas (Figura 27). O primeiro trecho monitorado está localizado no km 15+600 ao km 15+900, onde a solução de projeto consistiu na implantação de drenos verticais fibroquímicos (geodrenos) para consolidação de solos do subleito. Realizou-se a implantação de geodrenos, com o objetivo de melhorar a capacidade de carga do terreno de fundações de aterros e minimizar os efeitos de recalques absolutos e diferenciais dos maciços sobre solos compressíveis. Neste trecho tem-se altura de aterro de 4,00m estabilizados com bermas de equilíbrio.

O segundo trecho localiza-se no km 16+760 ao km 17+060, onde realizou-se a remoção de solos moles através da retirada dos materiais compressíveis, de baixa resistência. A substituição dos solos moles consistiu no preenchimento das cavas formadas pela remoção dos mesmos, por solo arenoso.

Através desta substituição formou-se um colchão drenante de areia executado com areia selecionada, aplicada diretamente sobre os terrenos de fundação de aterros compostos por materiais saturados e de baixa resistência ao cisalhamento, antecedendo a execução do aterro. Neste trecho tem-se uma seção com altura de aterro variável e profundidade de remoção de solos moles de 2,00m e altura de aterro de 4,00m.

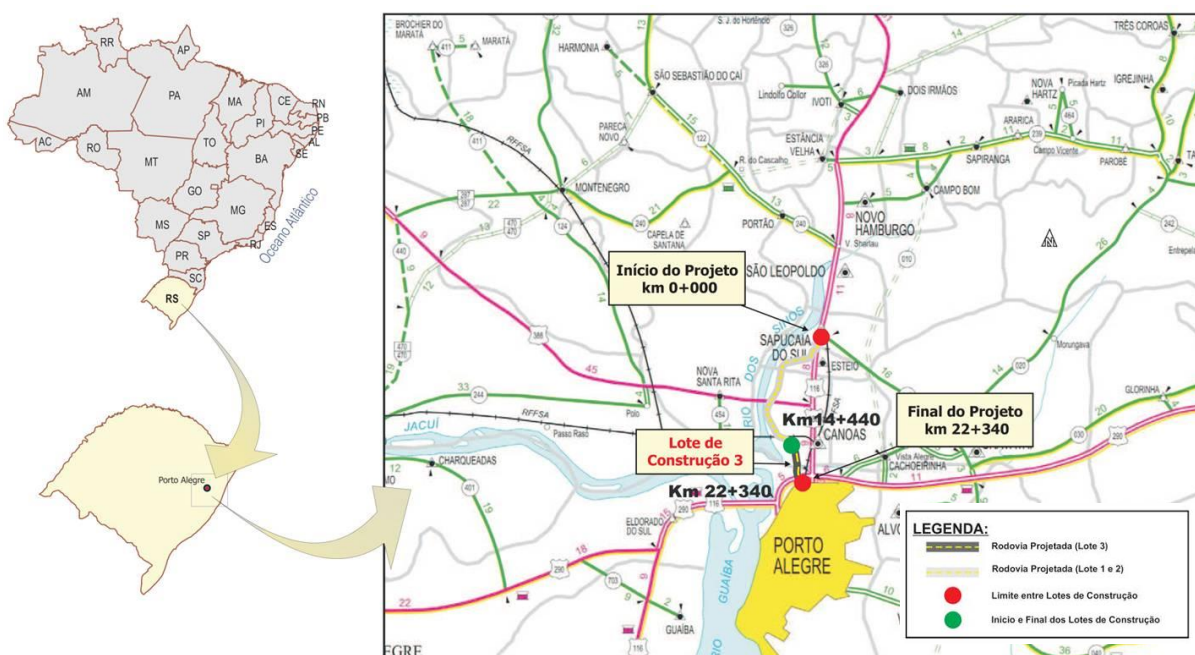


Figura 26 – Mapa de situação da Rodovia do Parque, BR-448/RS

Nos trechos monitorados as pistas de rolamento da linha geral são constituídas por três faixas de tráfego com 3,60m de largura cada. A largura do acostamento externo é de 3,00m, enquanto a largura do acostamento interno é de 1,10m, conforme apresentado na seção tipo da Figura 28. Nos trechos, as seções monitoradas estão ambas localizadas na terceira faixa de tráfego da Pista Sul (sentido Sapucaia - Porto Alegre).

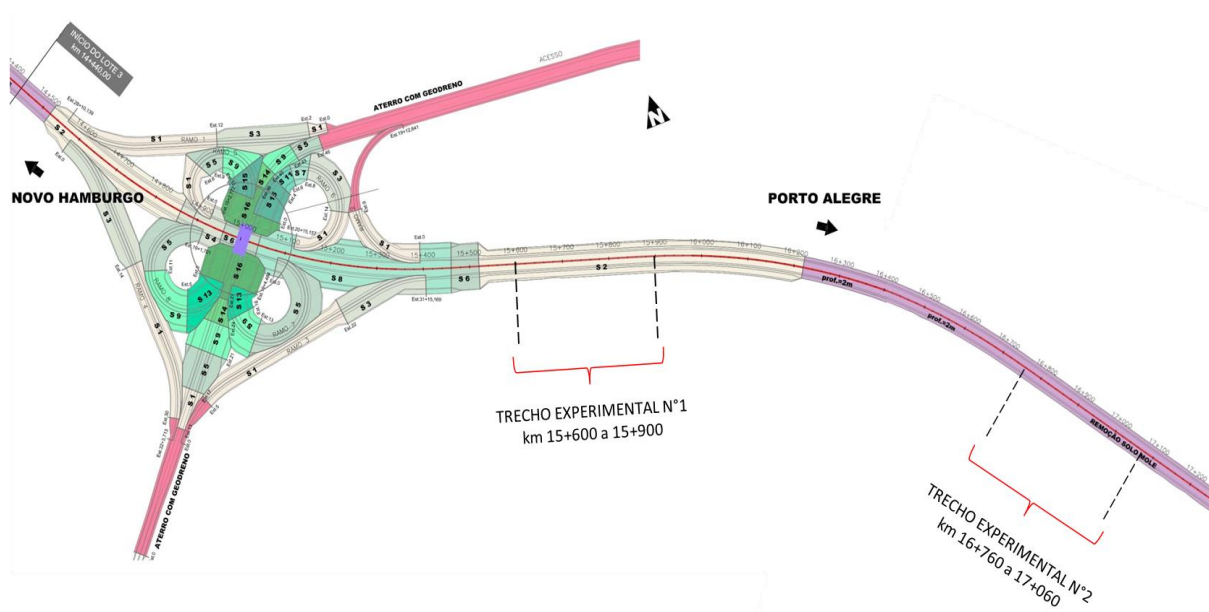


Figura 27 – Localização dos trechos monitorados da BR-448/RS - Rodovia do Parque

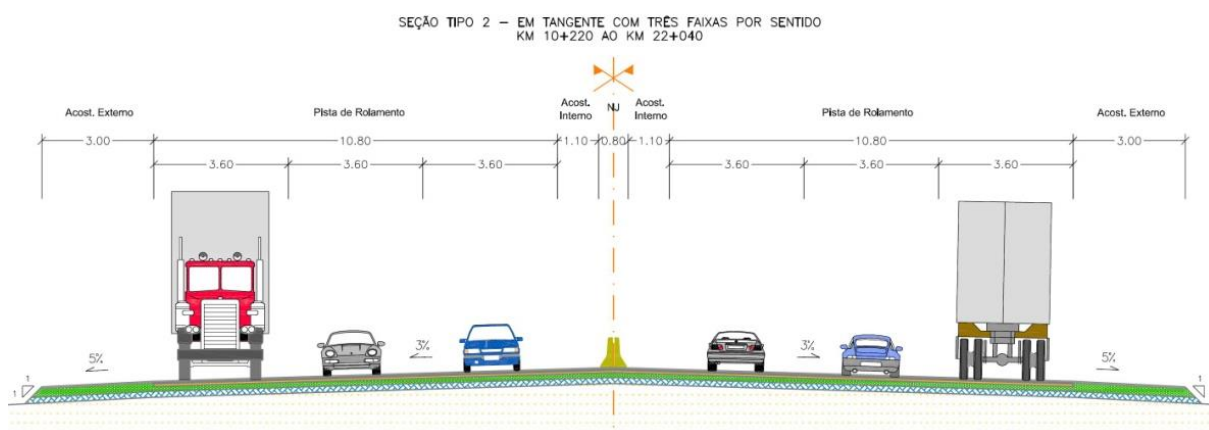


Figura 28 – Seção tipo do pavimento no decorrer dos trechos experimentais

O estudo de tráfego que subsidiou o projeto de pavimentação considerou o período de projeto de 10 anos, com abertura ao tráfego no ano de 2012. Apresentam-se a seguir os volumes de tráfego expressos em termos de N_{DNIT} e N_{AASHTO} , lembrando que os trechos experimentais da presente pesquisa estão inseridos no Sub-trecho 3 (Tabela 15).

Tabela 15 – Tráfego considerado para projeto do pavimento (10 anos)

Trechos	Localização	N _{DNIT}	N _{AASHTO}
Sub-trecho 3	km 14+440 e 18+130	9,80 x 10 ⁷	2,45 x 10 ⁷

Para a definição do pavimento, procedeu-se a um dimensionamento preliminar, empregando o Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis descrito no Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT/IPR-719/2006) com posterior realização de análises mecánísticas para ao cálculo de tensões e deformações atuantes em camadas de pavimentos e verificação da vida de fadiga através do modelo de previsão de desempenho do *South African Mechanistic Design Method* (SAMDM), descrito por Theyse (1996).

Para compor a estrutura do pavimento, foram considerados 4 materiais: (i) concreto asfáltico com asfalto modificado por polímero, (ii) concreto asfáltico convencional, (iii) base granular e (iv) sub-base de macadame seco. Iniciando com uma estrutura preliminar, as vidas de fadiga foram calculadas, aumentando as espessuras das camadas até que o número N de projeto fosse alcançado. Por fim, a estrutura foi definida com: 5cm de concreto asfáltico polimérico, 14cm de concreto asfáltico convencional, 19cm de base granular e 21cm da sub-base em macadame seco, conforme Figura 29.

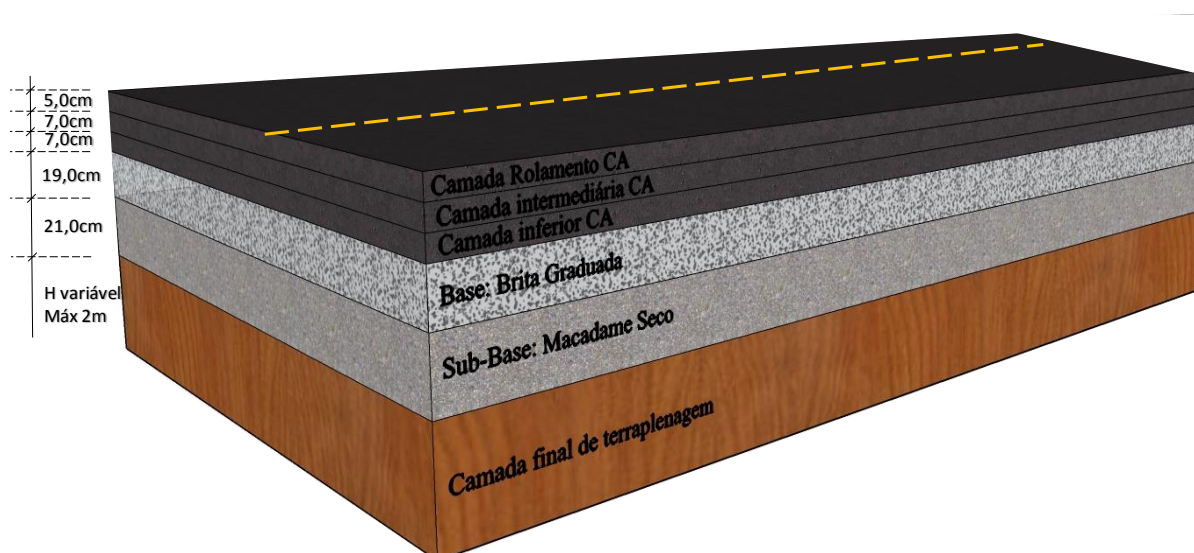


Figura 29 – Seção tipo de pavimentação em tangente nos trechos experimentais

O processo de execução da estrutura do pavimento está apresentado de forma sequencial na Figura 30 a seguir, com localização dos trechos monitorados e demais informações relevantes.



Figura 30 – Sequência de execução da estrutura do pavimento da BR-448/RS

Conforme apresentado na Figura 31 e na Tabela 16 a seguir, as etapas que constituem o plano de monitoramento do Projeto Integrado da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto foi desenvolvido integralmente, porém a apresentação das etapas, detalhes e resultados de ensaios realizados em sua total abrangência será delimitada nesta tese em função da quantidade de material gerado.

Será enfatizada de forma mais relevante a etapa de Pós-Execução, na qual se faz o monitoramento das condições dos trechos implantados através de uma série de avaliações periódicas brevemente descritas a seguir.



Figura 31 – Esquemática das etapas de monitoramento

O monitoramento esquemático de trechos experimentais, com conhecimento prévio das propriedades dos materiais das camadas constituintes e características da estrutura do pavimento, proporcionará através das avaliações periódicas das condições funcionais e estruturais estabelecer os principais mecanismos de degradação atuantes e comparar a sua tendência com modelos de previsão de desempenhos já existentes e/ou subsidiar o desenvolvimento de modelos próprios para as condições de contorno de cada trecho analisado.

Tabela 16 – Periodicidade das avaliações pós-execução dos trechos monitorados

Avaliação	Tempo 0	1 mês	6 meses	Ano 1	Ano 2 ao 5
Extração de Amostras do Revestimento¹	X		X	X	X
Avaliação de Deflexões	X		X	X	X
Irregularidade longitudinal	X		X	X	X
Microtextura e Macrotextura	X	X	X	X	X
Levantamento de Defeitos	X	X	X	X	X
Permeabilidade²	X		X	X	X
Levantamento visual		X		X	X

3.2 Monitoramento Pós-Execução dos Trechos Implantados

Serão apresentados no presente item as principais atividades desenvolvidas para avaliação dos trechos monitorados na etapa de Pós-Execução. Esta avaliação consiste, conforme mencionado anteriormente, no acompanhamento sistemático da evolução de parâmetros de desempenho funcional e estrutural dos trechos implantados, tais como, acompanhamento de irregularidade longitudinal (IRI), macrotextura superficial (Mancha de Areia - HS), microtextura superficial (Pêndulo Britânico), afundamentos nas trilhas de roda (ATR), levantamento de defeitos (LVC) e avaliação de deflexões do pavimento com emprego de Viga Benkelmann³ e *Falling Weight Deflectometer* (FWD)⁴. A seguir apresenta-se uma breve descrição de cada ensaio realizado.

¹ Etapa realizada somente na avaliação inicial, antes da abertura ao tráfego, nos trechos da BR-448/RS. Nos trechos da BR-290/RS fez-se avaliações com extrações em diferentes períodos de solicitação ao tráfego.

² Ensaio de permeabilidade não foi realizado em nenhum dos trechos analisados.

³ Trechos monitorados da BR-290/RS

⁴ Trechos monitorados da BR448/RS

3.2.1 Avaliação de Irregularidade Longitudinal (IRI) – Perfilômetro Laser

A determinação da irregularidade longitudinal de um pavimento é uma característica que influi na interação da superfície da via com veículos, gerando efeito sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e o motorista e sobre a carga transportada. Ela afeta a dinâmica dos veículos, tem influência sobre o custo operacional dos mesmos e ainda aumenta o seu desgaste.

As condições de conforto são avaliadas através da medição da irregularidade associada à via. A norma estabelecida pelo DNER no procedimento DNER-PRO 182/94 (DNER, 1994), define a irregularidade como sendo o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas.

Historicamente, a medida de irregularidade no Brasil era dada pelo *Quarter-car Index* (QI), porém, atualmente, há uma tendência de se adotar o *International Roughness Index* (IRI). Em grande parte, esta mudança se deve ao fato do QI não ser um índice utilizado nos países desenvolvidos, impossibilitando, assim, comparações diretas entre situações de malhas rodoviárias estrangeiras (BARELLA, 2008). Na presente pesquisa foi utilizado um Perfilômetro Inercial a Laser (Figura 32).



Figura 32 – Avaliação de irregularidade longitudinal com Perfilômetro Inercial Laser

3.2.2 Determinação Macrotextura Superficial – Ensaio de Mancha de Areia (Hs)

A forma de medição expedita mais empregada para determinação da rugosidade em pavimentos asfálticos (macrotextura) é através do ensaio da Mancha de Areia, normalizado pela norma ASTM E 965-06 “*Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*”.

O ensaio é relativamente simples e consiste em verter sobre o pavimento um determinado volume de areia calibrada fina, utilizando-se um disco com base de borracha, vai-se espalhando gradualmente em movimentos circulares até não se conseguir aumentar mais a mancha de areia. A areia vai entrando nas cavidades do pavimento. Mede-se o diâmetro da mancha de areia, e sabendo o volume inicial, é possível calcular a espessura média da mancha de areia, e é este o valor utilizado. O resultado é expresso em altura da areia (HS), em mm.

O ensaio caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento e quantifica a distância média entre os grânulos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento. (SILVA, 2008).

A execução dos ensaios nos trechos experimentais está representada na Figura 33.

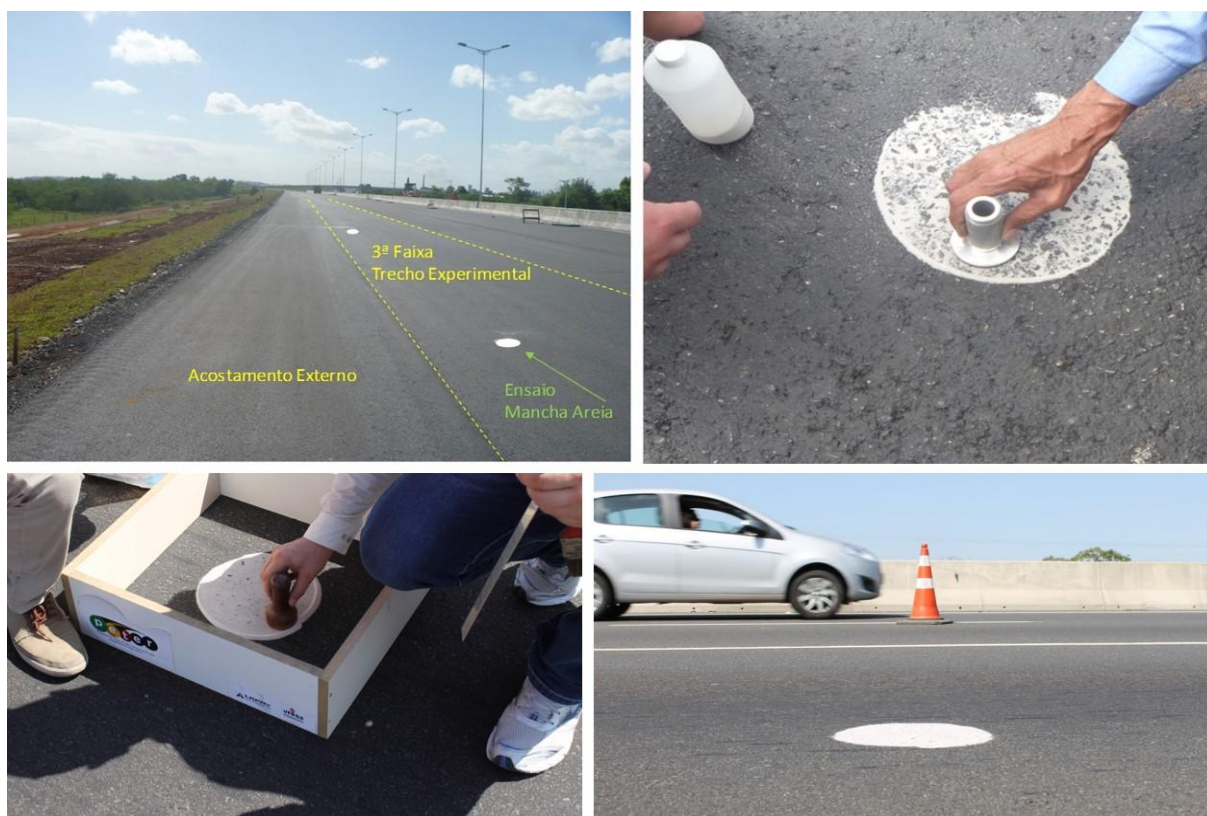


Figura 33 – Ensaio para determinação de Macrotextura - Mancha de Areia

3.2.3 Determinação Microtextura Superficial - Pêndulo Britânico (BPN)

As condições de segurança da superfície de rolamento dos trechos monitorados são avaliadas utilizando-se os ensaios para verificação do valor de resistência a derrapagem (VRD). Estes valores foram obtidos por meio de avaliações com o Pêndulo Britânico (Figura 34), equipamento e procedimento normatizado pela ASTM E 303-08 “*Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*”.

O ensaio determina a resistência à derrapagem na superfície e o valor de atrito medido por este equipamento é expresso em BPN (*British Pendulum Number*) ou, em português, VRD (Valor de Resistência à Derrapagem).

O princípio de funcionamento do Pêndulo Britânico é muito simples. Ao soltar-se a haste do pêndulo sobre o pavimento, a sapata desliza sobre o mesmo. A perda de energia decorrente deste movimento serve como medida de atrito, e é registrada em uma escala graduada. Neste sentido, em cada ponto de amostragem devem ser realizadas 5 determinações, sendo o valor de BPN respectivo, a média entre os valores obtidos. Os resultados são classificados em função da rugosidade.

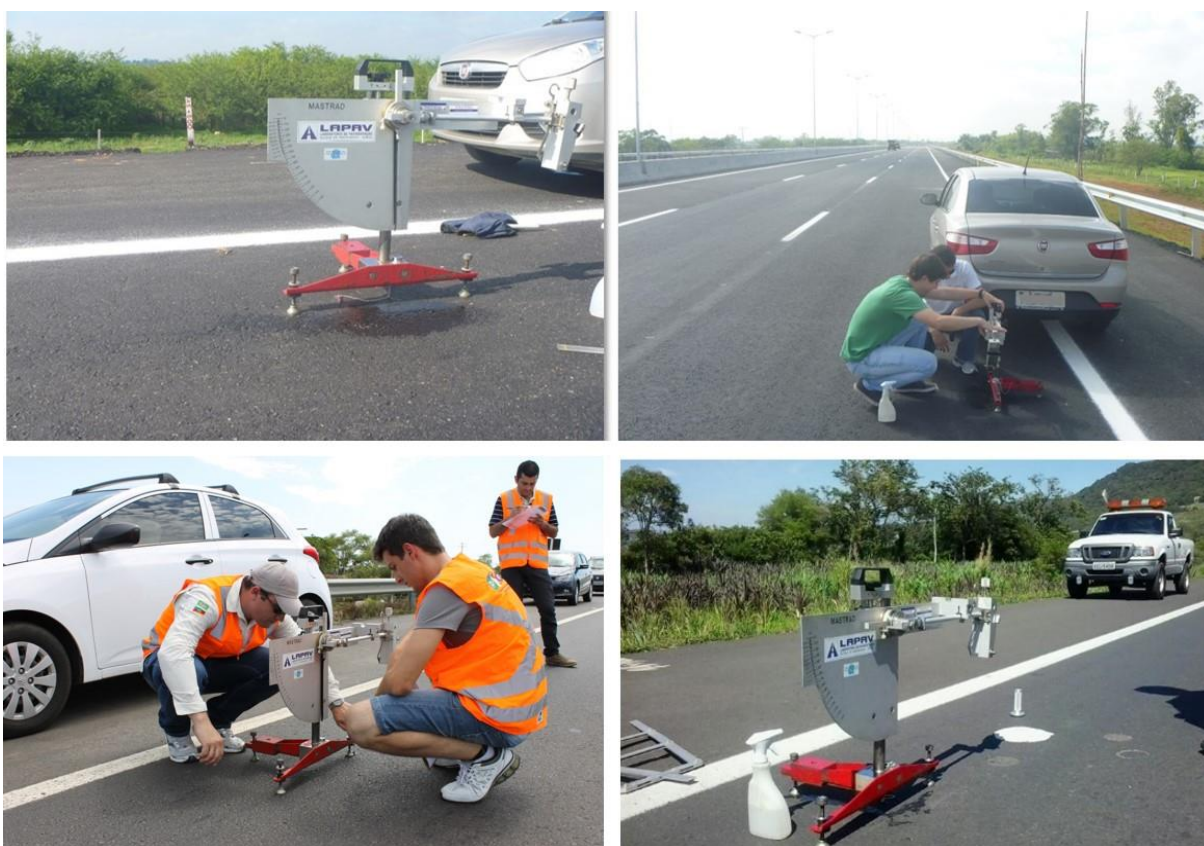


Figura 34 – Ensaio para determinação de Microtextura - Pêndulo Britânico

3.2.4 Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR)

Os Afundamentos nas Trilhas de Roda são deformações permanentes ocorridas no pavimento deixando como consequência um sulco onde passam os pneus dos veículos. São causadas pela consolidação inicial relativo ao grau de compactação das camadas granulares, por deformações estruturais e deformações plásticas das camadas asfálticas. Os afundamentos de trilha de roda podem ser levantados pelo procedimento referente à norma DNIT 006/2003-PRO, que determina a utilização de uma treliça de alumínio, padronizada, tendo 1,20 m de comprimento na base, dotada de régua móvel instalada em seu ponto médio, e que permite medir, em milímetros, as flechas de trilha de roda.

As deformações permanentes, em milímetros, foram medidas nas trilhas de roda interna (TRI) e na trilha externa (TRE) em cada estaca dos trechos monitorados correspondente ao ponto de máxima depressão, sob o centro de uma régua de 1,20m. As imagens da Figura 35 demonstram a realização dos ensaios.



Figura 35 – Ensaio para verificação de Afundamento de Trilha de Roda (ATR)

3.2.5 Avaliação Estrutural – Deflexões Viga Benkelman e FWD

Nos trechos da BR-290/RS, para avaliar a condição estrutural dos pavimentos monitorados foram realizados levantamentos defletométricos com Viga Benkelman. Os levantamentos de deflexões seguiram o prescrito pela norma DNER-ME 024/94 (Pavimento – Determinação das deflexões pela Viga Benkelman). Antes de cada levantamento, o equipamento foi aferido, seguindo o disposto no DNER-PRO 175/94 (Pavimento – Aferição de Viga Benkelman).

Durante os levantamentos de deflexões foram medidas as temperaturas do ar e da superfície do pavimento, em intervalos de tempo não superiores a 15 minutos; cuidando-se para que as leituras fossem feitas próximas às rodas traseiras do caminhão. A Figura 36 representa o procedimento de levantamento defletométrico sendo realizado.

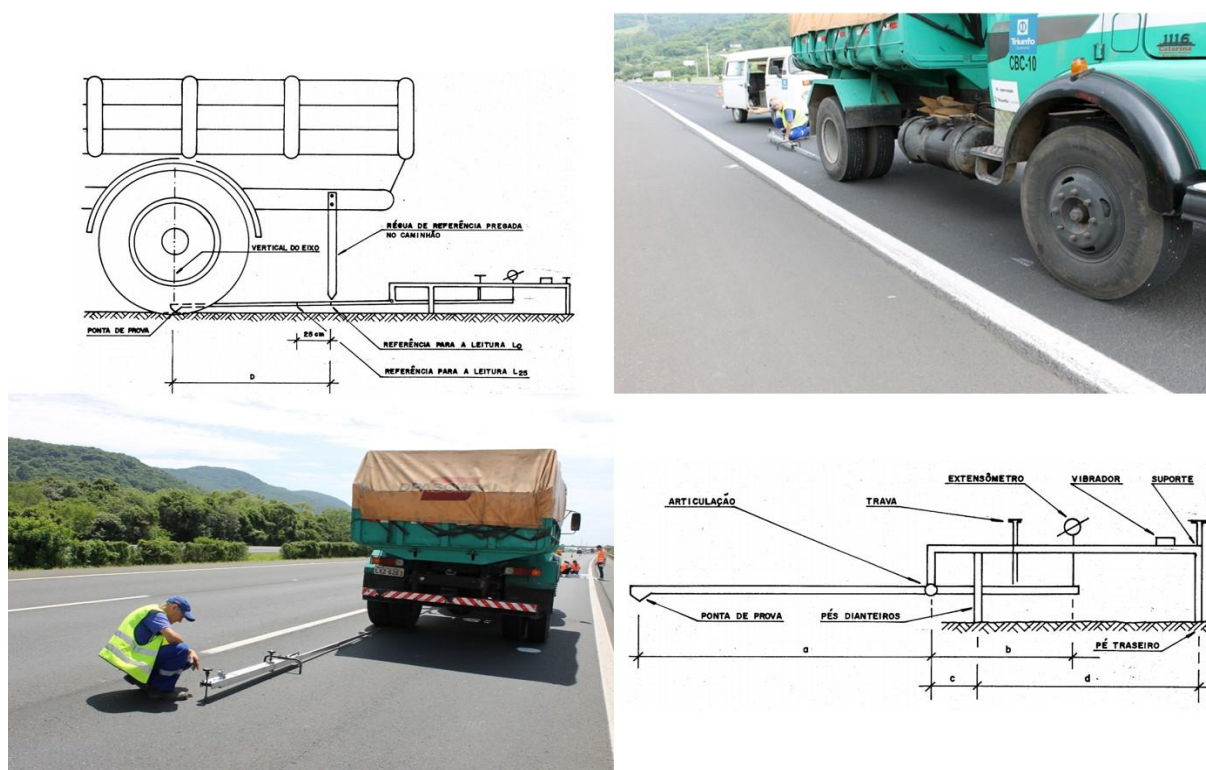


Figura 36 – Avaliação estrutural dos trechos monitorados através de Viga Benkelman

Conforme descrito anteriormente no programa experimental, empregou-se dois métodos distintos de avaliação estrutural nos trechos monitorados e analisados na presente tese.

Devido ao período de implantação ter ocorrido em períodos diferenciados (diferença de 3 anos) e com disponibilidade de infraestrutura de apoio distintos para ambos os casos, optou-se por realizar as avaliações estruturais nos novos trechos implantados na BR-448/RS com o emprego de um deflectômetro de impacto, o FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

Este equipamento é projetado para simular o efeito de cargas de roda em movimento sobre a estrutura do pavimento. Isto é obtido pela queda de um conjunto de massas, com alturas pré-estabelecidas, sobre um sistema de amortecedores de borracha, que transmitem a força aplicada a uma placa circular apoiada no pavimento (Figura 37).

Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento (bacia de deflexões) são medidos por 7 geofones (transdutores de velocidade) instalados na placa de carga e ao longo de uma barra metálica. As distâncias dos geofones ao centro da placa de carga são fixadas visando maximizar a acurácia em função da estrutura do pavimento ensaiado, procurando-se posicioná-los de forma que as deflexões neles registradas reflitam a contribuição das diversas camadas na deformabilidade total do pavimento e defina completamente a geometria da bacia.

Neste estudo foram empregados os seguintes espaçamentos para os geofones: 0, 20, 30, 45, 65, 90, 120 cm. Tem-se então que o primeiro geofone mede a deflexão sob a ação da carga (Df_1), o segundo geofone mede a deformação do pavimento a 20 cm do ponto de aplicação da carga (Df_2) e assim sucessivamente.



Figura 37 – Avaliação estrutural através de equipamento FWD-*Falling Weight Deflectometer*

3.2.6 Levantamento Visual de Defeitos (LVC)

Após a execução do Trecho Monitorado, antes da abertura ao tráfego, faz-se uma avaliação da qualidade de execução dos trechos a fim de constatar incompatibilidades com uma boa prática de pavimentação com especial atenção para o controle de acabamento superficial e verificação de segregação da massa asfáltica (Figura 38).

Após a abertura ao tráfego, a fim de identificar o início de ocorrência das patologias e posteriormente acompanhar sua evolução com o passar do tempo é realizado um levantamento visual detalhado dos mecanismos de degradação para quantificar com maior precisão as áreas deterioradas existentes ao longo do trecho monitorado.

O levantamento visual, LV, consiste na medida subjetiva das condições de superfície do Trecho Monitorado, feita por um ou um grupo de avaliadores, que percorrem a pé o trecho sob análise, registrando suas opiniões sobre a capacidade do pavimento de atender às exigências do tráfego que sobre ele atua, no momento da avaliação, quanto à suavidade e ao conforto. Este valor pode ser considerado correspondente à escala usada no VSA do DNIT (DNIT 009/2003 - PRO), porém, sem obrigatoriedade de serem 5 avaliadores, e levando em conta que, sendo o trecho curto, melhor será percorrer à pé, também para avaliação mais severa por ser trecho monitorado.

Este levantamento tem o objetivo de analisar a condição de superfície dos pavimentos de maneira detalhada, sendo realizado por pesquisadores e bolsistas que locam e caracterizam os defeitos existentes no pavimento do trecho, determinando as áreas com presença de manifestações de mecanismos de degradação como desgastes, trincamentos, panelas, erosões, afundamentos, etc.

As imagens apresentadas nas figuras a seguir representam algumas observações realizadas nos levantamentos visuais após a execução dos trechos monitorados, como por exemplo a ocorrência de segregação superficial de massa asfáltica em um mesmo trecho (Figura 38). Posteriormente faz-se a observação do surgimento de degradações no pavimento e sua posterior evolução com o tempo de abertura ao tráfego. Na Figura 39 observa-se o surgimento e a evolução de desgaste superficial com arrancamento de agregados em um dos trechos monitorados e na Figura 40 pode ser observado a ocorrência do mecanismo de degradação anterior, exsudação após aplicação de microrrevestimento asfáltico e evolução de trincamentos no trecho em acompanhamento.



Figura 38 – Segregação da mistura asfáltica após aplicação



Figura 39 – Evolução de patologias após abertura ao tráfego



Figura 40 – Levantamento visual com identificação de diferentes mecanismos de degradação

Através do programa de monitoramento implantado através do Programa Rede Temática com a caracterização dos materiais e definição das estratégias de projeto (etapa de Pré-execução), acompanhamento detalhado da construção dos trechos monitorados (etapa de Execução) e posterior acompanhamento da evolução das condições funcionais e estruturais dos pavimentos analisados pode-se ter um melhor entendimento da ação das solicitações externas no desempenho de um pavimento asfáltico dentro de suas diversas peculiaridades.

A metodologia de pesquisa adotada na presente tese visa, através deste conhecimento detalhado de fatores como a qualidade dos materiais e características da estrutura do pavimento, o esclarecimento dos mecanismos de degradação predominantes manifestados após ação do tráfego que solicita a estrutura projetada, com atenção especial para a influência da intensidade do carregamento (sobrecargas) e a ação climática sobre a estrutura analisada.

Após o acompanhamento da evolução dos mecanismos de degradação realizar-se-á uma seleção dos modelos de previsão de desempenho mais apropriados à realidade da rodovia e finalmente a comparação das tendências de desenvolvimento dos mecanismos de degradação com modelos existentes para posterior emprego dos dados na calibração dos modelos⁵, para dimensionamento de pavimentos novos e restaurações. Na Figura 41 estão representadas estas etapas.

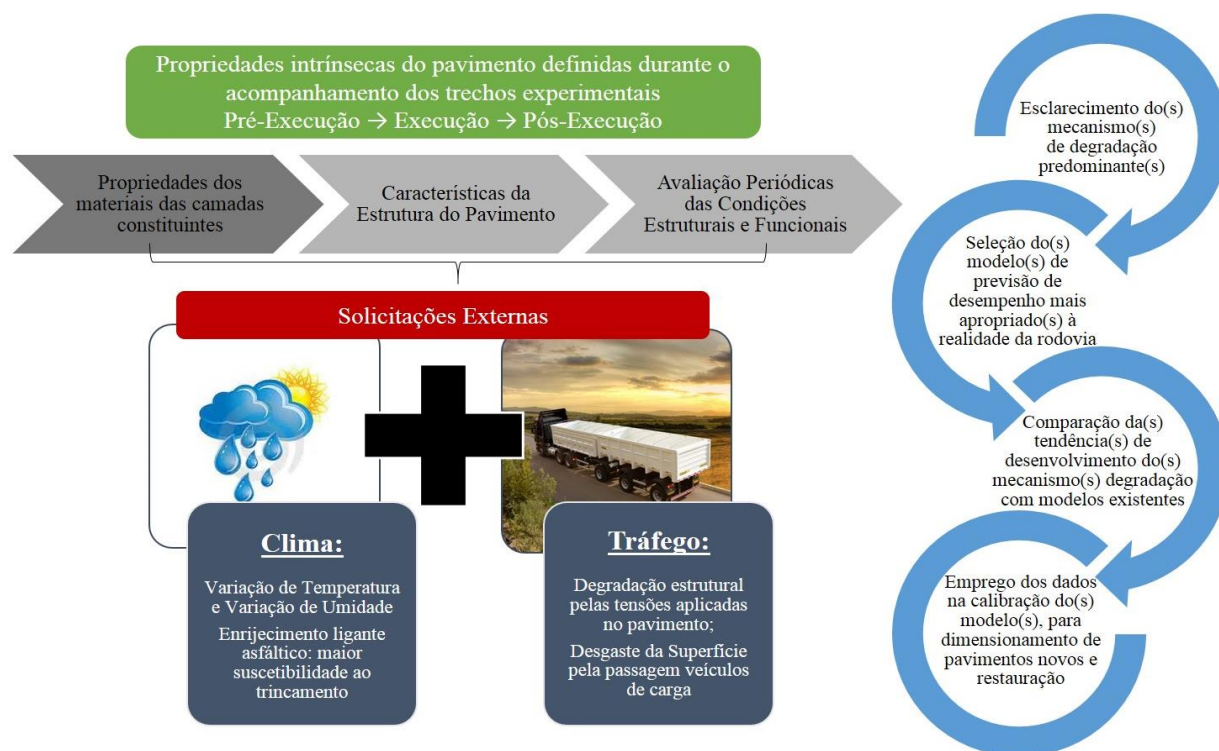


Figura 41 – Esquematização do plano experimental da pesquisa

⁵ Objetivo a ser atingido pelo Programa Integrado da Rede Temática de Asfalto juntamente com monitoramento sistemático de trechos experimentais nas mais diversas regiões do território nacional.

3.3 Monitoramento de Tráfego

Com um conhecimento detalhado do real tráfego que solicita a estrutura do pavimento em análise poderá se estabelecer uma relação entre a influência do tráfego com excesso de cargas, problema este de grande relevância na degradação prematura dos pavimentos rodoviários no contexto nacional, e o surgimento dos mecanismos de degradação e sua futura evolução.

Vale ressaltar que o conhecimento mais aprofundado das cargas que trafegam em nossas rodovias sempre foi uma grande incógnita, principalmente em virtude de deficiências na fiscalização das cargas transportadas, e sua consideração nos projetos sempre é realizada de forma simplificada. Fato que acaba sendo de grande relevância na diminuição da durabilidade das rodovias, pois a carga de tráfego que consiste na principal solicitação imposta à estrutura não é considerada de maneira correta, empregando-se apenas uma estimativa.

A avaliação de sua importância será apresentada de forma mais detalhada nos itens a seguir, com os quais pretende-se atingir os objetivos da presente pesquisa no que tange a classificação detalhada e a quantificação dos carregamentos de tráfego que solicitam os trechos monitorados.

Os dados de tráfego para os trechos monitorados foram obtidos através de estudos de tráfego realizados de maneira mais intensa e detalhada na rodovia BR-290/RS através das contagens e classificações realizadas no Posto de Pedágio localizado no km 19 da referida rodovia. Estes dados foram utilizados para definir e acompanhar a evolução do número N e assim determinar o tráfego solicitante dos trechos experimentais.

Além disso, realizou-se um importante monitoramento de cargas transportadas através de duas metodologias distintas, sendo elas, o acompanhamento dos dados de pesagens realizadas no PPVM (Posto de Pesagem Veicular Móvel) localizado na e através do banco de dados da Pesquisa de Pesagem em Movimento (WIM).

Para os trechos monitorados da Rodovia BR-448/RS não foi possível, dentro do período da presente tese, avaliar o tráfego em função das cargas circulantes. Tinha-se a perspectiva de instalação de sensores de pesagem dinâmica (WIM) através de uma parceria com empresas privadas, porém, até o presente momento o projeto ainda não foi formalizado e está sem perspectiva de implantação. Em função destes entraves, a avaliação do tráfego circulante na BR-448/RS foi realizada somente através de contagens classificatórias de tráfego, sem avaliação de cargas transportadas pela frota.

3.3.1 Posto de Pesagem Veicular Móvel (PPVM)

Os Postos de Pesagem Veicular – PPV – classificam-se em móveis e fixos. Em geral, os PPVM (móveis) funcionam em pontos pré-determinados da rodovia e utilizam equipamento portátil. Os equipamentos de pesagem podem ser divididos em equipamentos de pesagem estática e de pesagem dinâmica. O equipamento de pesagem estática, pesa o veículo parado sobre uma plataforma que comporta todos os seus eixos simultaneamente. Existem ainda equipamentos de pesagem estática por eixo que pesam eixos isolados ou conjunto de até 3 eixos, na condição de que o veículo deva estar parado por ocasião da pesagem.

O equipamento instalado na rodovia e objeto deste acompanhamento trata-se de um equipamento de pesagem dinâmica que afere o peso do veículo em movimento a baixa velocidade (cerca de 8 Km/h) sobre uma plataforma, por meio de sensores de pesagem, em cada eixo de maneira individualizada, apresentando os resultados da aferição por eixo ou por conjunto de eixos e o peso bruto total (PBT).

Para melhor compreender a metodologia de fiscalização referente às infrações por excesso de peso bruto por eixo de veículos, foi realizado um acompanhamento da operação do posto de pesagem da BR-290/RS km 65 PS. A seguir são apresentadas imagens do referido PPVM, é apresentada a localização do posto, sua infraestrutura e operação (Figura 42e Figura 43).



Figura 42 – Operação do PPVM do km 65 PS da BR-290/RS



Figura 43 – Localização, infraestrutura e operação do PPVM do km 65 PS da BR-290/RS

Com os acompanhamentos realizados durante a operação do PPVM foi possível um entendimento mais aprofundado das necessidades de adequação dos dados coletados a partir do sistema WIM para um refino da classificação do espectro de cargas em função da metodologia do DNIT e estudo comparativo entre o espectro coletado pelo WIM x PPVM. A seguir são apresentados os dados coletados durante o período de operação do Posto de Pesagem Móvel, os mesmos são analisados e confrontados com os resultados obtidos pelo Sistema WIM.

3.3.2 *Análise de cargas através HS-WIM (Pesquisa WIM)*

Através deste banco de dados tem-se a possibilidade de analisar de forma mais acurada as características de tráfego da rodovia pois conta-se com monitoramentos de 24 horas diárias por um significativo período de tempo (12 meses). Na Figura 44 está representado de forma esquemática o desenvolvimento para determinação do espectro de cargas através da pesquisa WIM, em sua Fase I e após na Fase 2 a análise da influência do espectro de cargas e das sobrecargas no desempenho dos pavimentos rodoviários.

Para suprir estas dificuldades e carências, a presente tese apresenta o diferencial de inserir-se em uma pesquisa de significativa relevância e de caráter inovador no cenário nacional quanto ao monitoramento de cargas de tráfego circulantes diretamente no fluxo da via. Neste contexto, fazem parte dos estudos de tráfego desta pesquisa o banco de dados formado através do monitoramento de tráfego através da implantação e operacionalização de um sistema de passagem em movimento de alta velocidade (HS-WIM) no “Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)” (Brito e Bock, 2013 & Brito *et al.*, 2013).

Após o término da primeira fase, com a determinação do espectro de cargas, iniciou-se uma segunda etapa na qual se propôs verificar qual o real impacto no pavimento ocasionado pelo espectro de cargas registrado. Esta fase foi intitulada como “Uso da tecnologia Weight-in-motion (WIM) para avaliação do desempenho de pavimentos asfálticos” e suas análises e conclusões fazem parte da presente tese (Brito *et al.*, 2014).

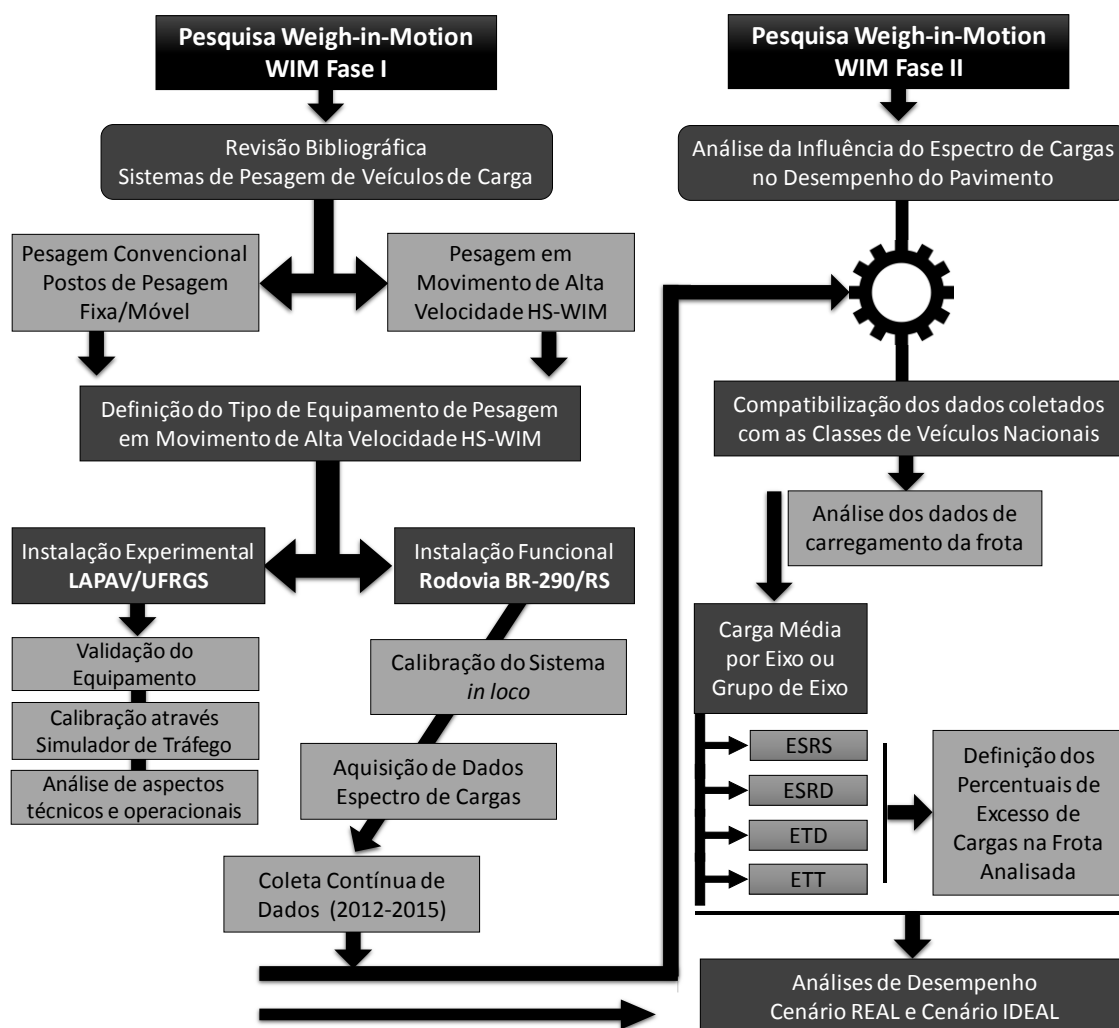


Figura 44 – Esquematização do plano experimental da pesquisa

As principais etapas da Pesquisa WIM são representadas de forma resumida no esquema da Figura 44 e nos itens a seguir. Maiores detalhes da Pesquisa WIM podem ser analisados nos relatórios completos desenvolvidos juntamente com a Concessionária da Rodovia Porto Alegre - Osório BR-290/RS - Freeway (Concepa), a Agência Nacional de Transporte Terrestre e a Prime Engenharia e Consultoria.

- **Sistema de Pesagem em Movimento de Alta velocidade (WIM)**

Os sistemas de pesagem em movimento, ou sistemas WIM, são capazes de estimar o peso total de um veículo e que parte desse peso é suportada (e, conseqüentemente, transmitida ao pavimento) por cada eixo ou grupo de eixos do veículo. Os sistemas de pesagem em movimento podem ser utilizados para pesagem em movimento a baixa velocidade ou a velocidade diretriz da via e para tanto utilizam diversas tecnologias compatíveis com suas funções.

Os sistemas WIM são constituídos de uma série de sensores, instalados em uma ou mais faixas de tráfego, adquirem valores como volume de tráfego e horários de ocorrência, velocidade, classificação do veículo baseada no número e no espaçamento de eixos, cargas por eixo ou total do veículo enquanto estes estão viajando na velocidade normal no fluxo de tráfego. Sistemas *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) permitem que todo tráfego que passam pela seção instrumentada seja monitorado, sem perturbação do fluxo de veículos na rodovia.

Observada a tendência de crescimento do fluxo de veículos de carga nas rodovias, e considerando a premissa de que o fluxo de veículos conformes, dentro dos limites legais, seja minimamente perturbado, a eficiência e efetividade do sistema vai depender diretamente do grau de automatização empregado na fiscalização, neste contexto sistemas automatizados como os de pesagem em alta velocidade (HS - WIM) merecem destaque especial.

Como o objetivo desta pesquisa consiste em identificar e analisar o espectro de carga que atualmente circula na rodovia BR-290/RS, trecho da Freeway, sem perturbação do tráfego com coleta de dados na velocidade padrão da rodovia, foi este o sistema utilizado: um sistema de HS-WIM (Sistema de Pesagem em Movimento de Alta Velocidade).

Mais detalhes do sistema e metodologia de instalação, calibração e aquisição de dados serão descritos de forma simplificada nos itens que seguem. Mais detalhes podem ser consultados nos relatórios finais de pesquisa RDT CONCEPA/ANTT, disponíveis no site da ANTT (http://www.antt.gov.br/Relatorios_de_Pesquisa_RDT).

○ **Definição dos Sensores**

Para a escolha dos sensores a serem empregados na pesquisa, dentre os diversos tipos e modelos de sensores disponíveis no mercado, foram levadas em consideração algumas premissas para a definição do tipo que melhor atenderia o propósito da pesquisa. Alguns elementos chave precisaram ser analisados no intuito de que a instalação de um sistema de WIM pudesse alcançar os objetivos propostos.

Primordialmente, a escolha foi direcionada a um sistema já existente, pronto para instalação e uso. Devido ao fato da pesquisa ter como objetivo principal avaliar o espectro de cargas, a parte eletrônica do equipamento não foi questionada, diferentemente de outros projetos em desenvolvimento, a exemplo do projeto DNIT/UFSC que abordou sobretudo deste ponto de vista.

Num segundo momento, um dos mais importantes itens investigados diz respeito a acurácia, confiabilidade do sistema e sua facilidade de uso. Sabe-se que o sistema deverá apresentar características mínimas de precisão e operação que permita coletar dados que permita a determinação do espectro de cargas na rodovia BR-290/RS no trecho da Freeway, com a melhor confiabilidade disponível.

Avaliou-se também a facilidade de aquisição do equipamento no país, dentro de tempo hábil, levando em consideração que os trâmites burocráticos de importação poderiam levar a inexequibilidade da pesquisa.

Neste contexto de análises, o sistema WIM que se mostrou de potencial uso foi sem dúvida de acordo com a literatura a configuração de equipamento chamado "*Piezo+Loop+Piezo*". A instalação de um *loop* magnético entre os sensores WIM utilizados - no caso piezoelétricos - é necessário para que seja feita a classificação dos veículos.

O uso de sensores piezoelétricos convencionais - pequenos fios metálicos com uma cerâmica piezoelétrica dentro, aceitam pequenas dobras sem prejuízo do seu funcionamento. Aceitam, assim, pequenas deformações permanentes, contrariamente ao sistema Kistler Lines. Apesar de mais precisos podem vir a representar problemas em pavimentos com pequena deformação permanente. Sistemas com uso da configuração *Piezo+Loop+Piezo* atingem usualmente confiabilidade de 90% e foram, assim, a melhor opção custo benefício.

○ **Sistemas WIM piezométrico**

Os Sistemas WIM piezométricos são compostos por um ou mais sensores piezométricos, laços indutivos e sistemas de aquisição e tratamento de sinais. Os sistemas piezométricos detectam uma variação na tensão causada pela pressão exercida no sensor pelo eixo e por meio disso mede a força de impacto que pode ser transformada em peso do eixo. Quando um veículo passa sobre o sensor piezométrico, o sistema registra a saída de tensão do sensor e calcula a carga dinâmica.

Os materiais utilizados nos sistemas WIM piezométricos são de quartzo, cerâmica e polímero e podem ser usados em intervalos maiores de velocidade (20 a 120 km/h), dependendo do fabricante e da tecnologia empregada. Os sistemas WIM piezométricos podem ser utilizados para monitorar várias pistas simultaneamente, sendo sua vida útil de 3 a 5 anos.

As classes com as categorias dos sistemas de pesagem em movimento conforme a normatização ASTM E1318-02 são apresentadas a seguir. As categorias de sistemas WIM são listadas na Tabela 17 juntamente com a aplicação e os dados disponibilizados pelos sistemas de cada classe (ASTM E1318- 02, 2002). Para a implantação nesta pesquisa foram utilizados sistemas Tipo I.

Tabela 17 – Categorias de Sistemas de pesagem em movimento (ASTM E1318-02)

Descrição do item	Classes ou Categorias			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Velocidade	16 a 130 Km/h	16 a 130 Km/h	16 a 130 Km/h	3 a 16 Km/h
Aplicação	Dados Coletados	Dados Coletados	Dados Coletados	Dados Coletados
Carga por roda	•		•	•
Carga por eixo	•	•		•
Carga por grupo de	•	•	•	•
Peso bruto	•	•	•	•
Velocidade	•	•	•	•
Espaçamento entre	•	•	•	•
Classe do veículo	•	•		
Identificação do posto	•	•	•	•
Pista/sentido de direção	•	•	•	
Data e hora	•	•	•	•
Nº Sequencial de	•	•	•	•
Distância entre eixos (+)	•	•		
ESAL	•	•		
Código da infração	•	•	•	•
Aceleração			•	•

A Tabela 18 apresenta os requisitos de desempenho funcional dos sistemas WIM conforme definidos pela ASTM (ASTM E1318-02, 2002).

Tabela 18 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM (ASTM E1318-02, 2002)

Função	Tolerância (95% de probabilidade)				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Kg	±Kg
Carga por roda	± 25%	-	± 20%	2300	± 100
Carga por eixo	± 20%	± 30%	± 15%	5400	± 200
Carga por grupo de eixos	± 15%	± 20%	± 10%	11300	± 500
Peso bruto	± 10%	± 15%	± 6%	27000	± 1100
Velocidade	± 2 km/h				
Espaçamento entre eixos	± 0,15 m				

A acurácia dos sistemas WIM é função de quatro principais fatores, sendo eles, dinâmica do veículo; integridade, composição e projeto do pavimento; variância inerente no sistema WIM e calibração. A Tabela 19 fornece alguns valores típicos para a acurácia para sistemas WIM.

Tabela 19 – Valores típicos de acurácia (intervalo de confiança $\pm 1\sigma$)

Tecnologia de Pesagem em Movimento	Acurácia na medida de carga por grupo de eixos	Acurácia na medida do peso bruto total
Cabo Piezelétrico	12%	10%
Sensor de Quartzo	10%	8%
“Bending plate”	3%	2%
Célula de carga	2%	1%

Na Figura 45 é apresentada uma imagem do equipamento selecionado e o sistema de aquisição de dados (ROADTRAX® BL PIEZOELECTRIC AXLE SENSOR & HI-TRAC® 100+) juntamente com algumas informações técnicas importantes.



Figura 45 – Equipamento, sistema de aquisição de dados e informações técnicas

○ Seção Teste de Pesagem WIM

A localização exata para instalação do equipamento foi discutida juntamente com os técnicos da Concessionária, onde foi definido como sendo o local mais apropriado para instalação do Sistema WIM as proximidades do km72 (pista sul - sentido Porto Alegre - Osório) da rodovia BR-290/RS Freeway. Próximo ao local da instalação do sistema WIM tem-se a presença de uma balança fixa para eventuais verificações de cargas utilizadas na calibração dos sensores.

A seguir são apresentadas algumas características do segmento teste. Realizou-se uma visita para conhecimento detalhado do local, observar as condições do entorno e do pavimento (excesso de ATR, trecho em aclave, declive ou em curva não são desejáveis), realizar medições de largura das faixas para instalação dos sensores e da largura total da rodovia naquele local.

O sistema de WIM deve se valer também de uma sonda de temperatura. Esta é utilizada para medir a temperatura do pavimento, cuja deformação deverá ser corrigida em função do gradiente térmico naquele instante.

A seguir, na Figura 46 é apresentada uma representação esquemática da aplicação do sistema WIM. No caso da instalação do equipamento na rodovia é importante que o sensor ocupe o máximo de extensão da faixa de monitoramento. Dispõe-se na rodovia de três faixas de rolamento e acostamento em ambos os lados, totalizando uma largura final da pista de 16,25m. A aplicação dos sensores e do laço indutivo será realizado em duas faixas da rodovia (Faixa 2 e Faixa 3) com largura de 3,75m.

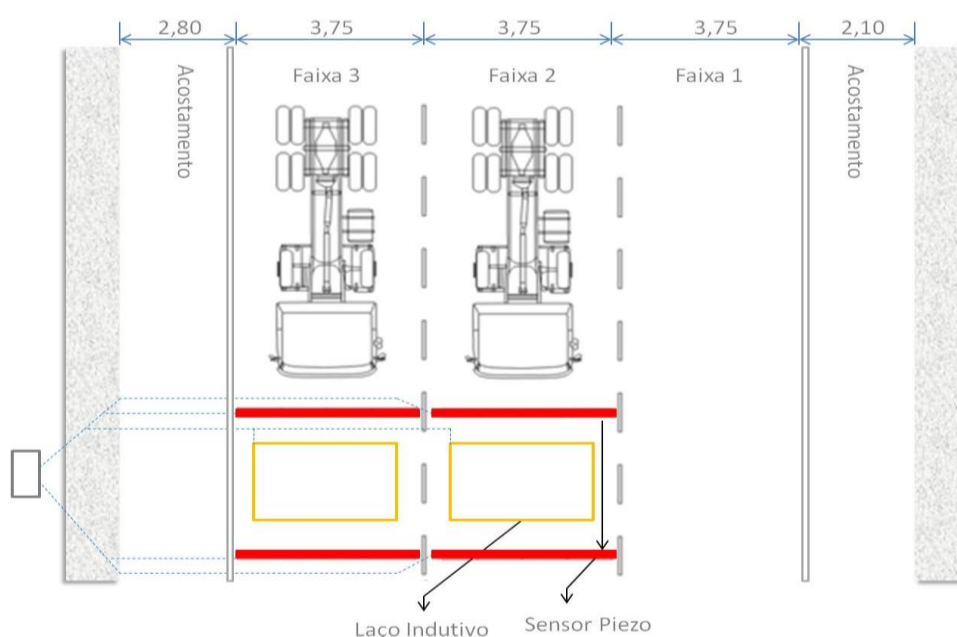


Figura 46 – Representação esquemática da instalação do equipamento HS-WIM

○ **Instalação do Sistema WIM**

Inicialmente, após a definição do sistema a ser adquirido realizou-se uma instalação experimental do equipamento para sua validação nos aspectos técnicos e operacionais. Nesta etapa foi realizada a instalação do equipamento em uma Pista Experimental na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos da UFRGS.

Esta etapa permitiu que o sistema fosse estudado para uma implantação acurada no que se refere à sua instalação física para melhor funcionamento, e também calibração do sistema através do uso do Simulador de Tráfego do Laboratório de Pavimentação LAPAV/UFRGS, onde foram aplicadas cargas em movimentos para ajuste dos sensores e hardware de aquisição. Este período de investigação facilitou o estabelecimento de um protocolo de coleta de dados que garantiu a usabilidade dos resultados.

Posteriormente com a implantação *onsite* na Freeway do sistema de pesagem em movimento desenvolveu-se de maneira mais facilitada em função da experiência anterior adquirida com a instalação experimental na Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos da UFRGS.

Neste item são apresentados, de forma simplificada, os procedimentos adotados para a instalação dos sensores piezoelétricos do sistema WIM na BR 290/RS. Resumidamente, no processo de instalação é necessária a execução de cortes superficiais no revestimento nas dimensões compatíveis ao tipo de sensor, de acordo com a especificação do produto.

Na Figura 48 é apresentado um layout típico de instalação de instalação de sensores WIM, onde a configuração adotada é aquela escolhida como sendo a mais adequada para a pesquisa realizada, ou seja, um sistema composto por dois sensores piezoelétricos e um laço indutivo (*Piezo + Loop + Piezo*).

Já na sequência, na Figura 48, apresenta-se de forma simplificada a disposição dos sensores dentro dos cortes realizados no revestimento através de um sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores através de ganchos específicos fornecidos juntamente com o equipamento.

Os procedimentos de instalação do equipamento de pesagem dinâmica WIM compreendem uma série de etapas desde a escolha e preparação do local de instalação até a calibração do sistema para aquisição dos dados de pesagem. A seguir na Figura 49 estão apresentadas as principais etapas deste procedimento com uma breve descrição e representação fotográfica.

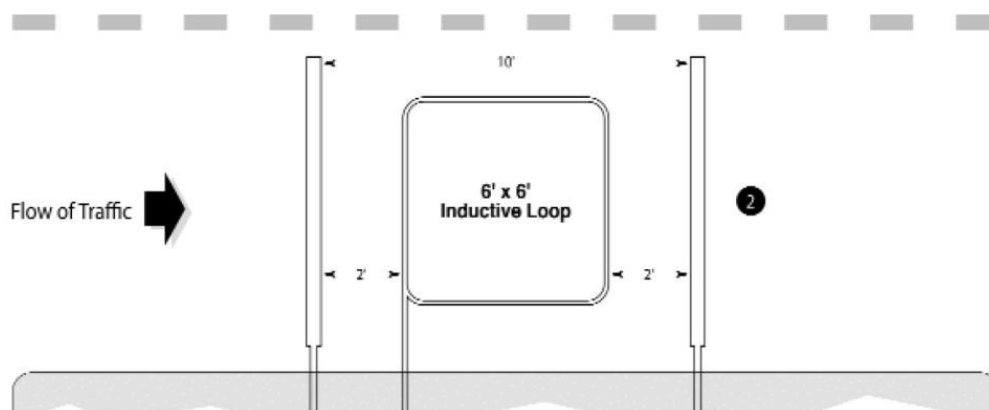


Figura 47 - Layout típico de instalação de sensores WIM

Durante o processo de instalação dos sensores piezoelétricos deve-se tomar cuidado para garantir a correta largura e profundidade de realização dos cortes e posterior localização dos sensores dentro do corte para garantir um correto funcionamento do sistema.

Além da instalação dos sensores piezoelétricos e dos laços magnéticos que compõe o sistema Piezo + Loop + Piezo é instalado junto a esta configuração um sensor de temperatura para verificação e calibração das leituras realizadas em função da variação do gradiente térmico.

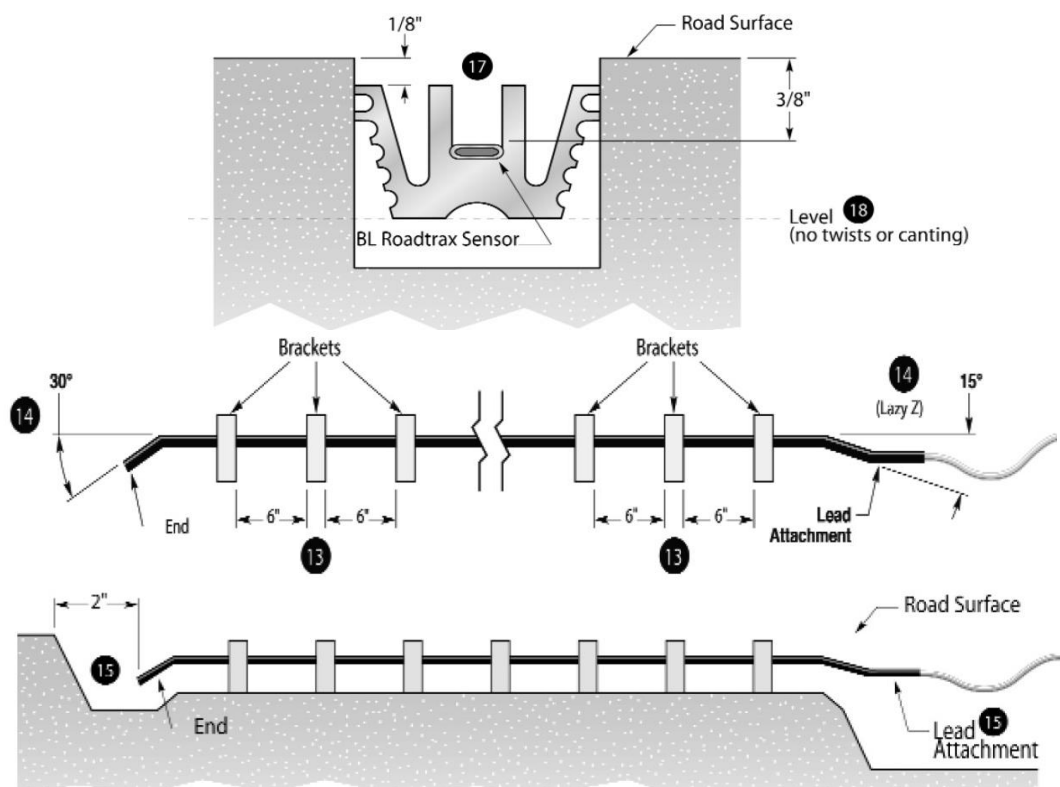


Figura 48 - Sistema de centralização, alinhamento e fixação dos sensores dentro do corte de instalação através de ganchos específicos (Fonte: Manual de instalação do fabricante)

Etapas	Descrição	Imagem
Limpeza das faixas	Não foi necessária uma limpeza das faixas onde foram instaladas as linhas de sensores pelo fato de não haver sujeira acumulada.	
Demarcação dos locais de corte no pavimento	A demarcação foi realizada através da locação espacial de pontos notáveis com o auxílio de trena e régua metálica ao longo da seção transversal do pavimento. Procedeu-se com uma pintura com tinta Spray, ligando os pontos notáveis por linhas esticadas, demarcando assim o local preciso de corte para instalação dos sensores.	
Corte do pavimento	O corte do pavimento foi realizado por um equipamento portátil dotado de uma serra circular diamantada, utilizada correntemente em cortes de pavimentos asfálticos. A largura necessária para instalação (20mm) exige a execução de dois cortes paralelos para obter a espessura de corte especificada para o tipo de sensor a ser instalado.	
Limpeza do corte	Fez-se a retirada do revestimento existente entre os dois cortes com o auxílio de martelo e talhadeira. Com auxílio de um soprador fez-se a limpeza final dos cortes executados.	
Preparação dos sensores	A preparação dos sensores consiste na sua inspeção visual, os mesmos são verificados se estão retos, sem torções ou quebras, é recomendada a utilização de luvas de látex para manuseio dos sensores. Após a inspeção visual dos sensores foram fixados os espaçadores conforme recomendação do fabricante.	
Instalação dos sensores:	Após a acomodação do sensor no interior das canaletas de corte realizado no pavimento, o mesmo foi posicionado na profundidade correta com o auxílio do gabarito que garante a sua profundidade adequada.	
Selagem - aplicação do "grout"	O "grout" é uma resina (tipo epóxi) que fixa os sensores dentro das canaletas abertas através de cortes no pavimento. Deve-se tomar cuidado para evitar a formação de bolsões de ar, o que pode comprometer o funcionamento do sensor.	
Finalização do "grout" e acabamento final	Após instalação completa dos sensores e cura da resina foi realizado o acabamento com o auxílio de uma lixadeira para deixar nivelada a resina com a superfície.	
Aspecto final da instalação	Aspecto final da instalação dos sensores piezoelétricos e do laço indutivo na terceira faixa de rolamento da rodovia.	

Figura 49 – Resumo das etapas de instalação do sistema WIM na BR-290/RS

○ Calibração do sistema WIM após instalação

Para a calibração do sistema WIM foram realizadas diversas baterias de testes com o intuito de avaliar a operacionalidade e a consistência do sistema instalado nas duas faixas da rodovia. Os testes realizados durante o processo de calibração foram programados para abranger corridas de teste a diferentes velocidades, temperaturas e carregamentos, sendo que tais velocidades e carregamentos procuram refletir as condições operacionais da via.

A coleta de dados nos testes controlados seguiu um conjunto de parâmetros e especificações geradas pela equipe técnica envolvida na pesquisa para permitir a verificação em profundidade do comportamento do hardware e software incorporados nos sensores e sistemas (Tabela 20).

Tabela 20 – Veículos de teste e parâmetros para calibração do sistema

Veículo de teste	Carga	Temperatura	Velocidade
Caminhão trucado (3C)	PBT de 20,5 t	Manhã: 20 a 25°C	Operacional: 80 a 100km/h
Caminhão trator + Semi Reboque (2S3)	PBT de 34,5 t	Tarde: 40 a 50°C	Inferiores: 40 a 60km/h

Na Figura 50 observa-se a aproximação dos veículos de teste, com as faixas de instalação do sistema interditadas para o fluxo normal de tráfego.



Figura 50 – Aproximação simultânea dos dois veículos de teste (2S3 e 3C) para pesagem em movimento na velocidade diretriz da rodovia (Fonte: Câmera do Sistema WIM)

○ Operacionalização do sistema – Coleta de Dados

Após o sistema instalado e já se encontrando totalmente funcional, a coleta de dados foi realizada ininterruptamente. O sistema foi instalado próximo a um pórtico contendo painel de mensagem variável o que permitiu conexão com o sistema de banco de dados da Concessionária diretamente através de fibra ótica.

Na Figura 51 é apresentada uma visão geral da seção de testes, com o pórtico no qual ficam instalados os sistemas de aquisição e transmissão de dados e videomonitoramento. Foi também instalado junto ao PMV do km72 da Pista Sul da Rodovia uma câmera que permite o acompanhamento do sistema. Isto é muito importante pois viabiliza a certificação de uma adequada classificação do sistema.




Figura 51 – Local de instalação do sistema de pesagem em movimento

3.3.3 Desenvolvimento de Banco de Dados e Análise dos Resultados

Para a aquisição, coleta e armazenamento dos dados de pesagem, foi desenvolvido um sistema pelo Departamento de Tecnologia de Informação (TI) da Concessionária (CONCEPA) capaz de armazenar os dados obtidos do sistema de Pesagem em Movimento de forma *online*.

O sistema permite a escolha da data inicial e final a ser consultada e gera automaticamente um arquivo de dados no qual é possível de qualquer lugar acessar os dados e fazer as análises necessárias. Desta forma é possível a partir de um sistema disponibilizado *online* (Figura 62) da concessionária exportar o fluxo de veículos com sua classificação e pesagem já obtida, contendo todos os parâmetros necessários conforme mostra a representação a seguir.



Exportação Fluxo de Veículos

Analisador de Tráfego: Gravatá (Pesagem) - Km 72

Data Inicial: Data Final: **Consultar**

VBVID	EquipmentID	Timestamp	VehicleLenght	ChassiCode	VehideSpeed	VehicleClass30	VehicleClass8	VehideClass4	VehicleClass2	VehideWeight	VehideLane	VehideAxles
504651	8	2013-04-12 08:59:58.600000C	17500	31	68	9	G	C	B	11900	1	4
504647	8	2013-04-12 08:59:44.000000C	17800	25	88	18	H	C	B	22400	1	6
504636	8	2013-04-12 08:58:54.000000C	17500	41	91	17	H	C	B	31100	1	5
504617	8	2013-04-12 08:56:22.600000C	17800	35	77	17	H	C	B	24900	1	5
504615	8	2013-04-12 08:55:51.800000C	17100	33	81	14	H	C	B	13100	1	4
504611	8	2013-04-12 08:55:35.200000C	16700	41	73	17	H	C	B	19100	1	5
504609	8	2013-04-12 08:55:29.000000C	17200	31	67	18	H	C	B	23700	1	6
504580	8	2013-04-12 08:51:58.800000C	15200	25	68	14	H	C	B	12500	1	4
504574	8	2013-04-12 08:51:25.900000C	17300	31	74	9	G	C	B	18600	1	4
504573	8	2013-04-12 08:51:24.300000C	14900	33	75	18	H	C	B	39600	1	6
504559	8	2013-04-12 08:49:59.800000C	17200	29	77	17	H	C	B	28100	1	5
504535	8	2013-04-12 08:47:48.500000C	15700	31	72	18	H	C	B	33900	2	6
504533	8	2013-04-12 08:47:12.700000C	15600	30	73	18	H	C	B	39800	1	6
504518	8	2013-04-12 08:45:00.000000C	12300	24	81	14	H	C	B	12500	2	4
504472	8	2013-04-12 08:39:54.600000C	13000	29	77	18	H	C	B	36700	1	6
504470	8	2013-04-12 08:39:37.000000C	16300	26	76	18	H	C	B	29500	1	6
504447	8	2013-04-12 08:36:37.000000C	17000	27	74	14	H	C	B	15200	1	4
504445	8	2013-04-12 08:36:26.700000C	15800	24	77	17	H	C	B	33000	1	5
504436	8	2013-04-12 08:35:16.800000C	18600	27	91	10	G	C	B	32100	1	5
504429	8	2013-04-12 08:34:23.900000C	17800	25	80	18	H	C	B	33100	1	6
504424	8	2013-04-12 08:33:41.200000C	15600	30	76	18	H	C	B	32300	1	6
504423	8	2013-04-12 08:33:36.600000C	13000	26	69	14	H	C	B	9600	1	4

Figura 52 - Tela do software online de acesso remoto ao sistema de pesagem WIM implantando na Rodovia BR-290/RS – Freeway e formato dos dados exportados

A parte relativa à Tecnologia de Informação é uma grande barreira nestes sistemas que foi poupado de ser descrito em detalhe nesta pesquisa - já que foge ao seu escopo - mas que sem ela o projeto não seria possível de sobremaneira.

Houve um grande envolvimento do departamento de TI da Concepa para que fosse viável a implantação deste sistema, debruçando seus técnicos e equipe administrativa para tornar viável a implantação de um sistema já gerenciado. Isto permite que a coleta de dados ocorra automaticamente e com segurança dos dados do Data Center da Concessionária.

Por outro lado, por tratar-se de um sistema importado, outro grande desafio foi o de compatibilizar os dados gerados pelo sistema em dados de classificação segundo configurações homologadas do país pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

3.3.4 Estudo comparativo de cargas e tráfego monitorado (PPVM x WIM)

O objetivo para o qual esta etapa do projeto foi proposta diz respeito a um entendimento do quão diferente pode ser a caracterização do espectro de cargas realizada por estes dois métodos distintos, o primeiro através do monitoramento das cargas através do Posto de Pesagem Veicular Móvel (PPVM) para controle de cargas que trafegam na rodovia e a implantação de um sistema de pesagem de alta velocidade (HS-WIM).

O primeiro método, conforme já mencionado, apresenta uma série de limitações quanto ao objetivo de um acompanhamento completo da frota de veículos comerciais que circulam na rodovia. Geralmente não há um monitoramento contínuo, permitindo a livre circulação dos veículos com excesso de cargas nos horários e dias em que o posto não está em funcionamento.

Possíveis rotas de fuga podem ser adotadas pelos transportadores ao tomar ciência do funcionamento do posto de pesagem através de comunicação entre os motoristas conforme relatado pelos operadores da balança.

Outros problemas comumente relatados dizem respeito a gargalos de infraestrutura, em que, dependendo do volume de veículos retidos em função de não conformidade acabam lotando os pátios e/ou ocorrendo a formação de enormes filas, ou até em casos mais graves, a interrupção do funcionamento do posto devido aos fatores descritos.

No segundo sistema, realiza-se o monitoramento de 100% da frota circulante na rodovia e sem perturbações ao fluxo de tráfego, pois o monitoramento não necessita de desvio dos veículos comerciais do fluxo normal de tráfego e sem redução de velocidade para tal, sendo possível realizar o monitoramento na velocidade diretriz da via.

Além destes fatores, o sistema pode ser considerado “invisível” ao transportador que não sabendo seu local de implantação e funcionamento acaba impedindo a adoção de rotas alternativas para fuga do monitoramento e controle de carregamento.

Durante o período de pesquisa para determinação do espectro de cargas, os dados das pesagens para controle de cargas realizado pelo posto de pesagem móvel (PPVM) foram coletados, analisados e confrontados com os dados obtidos pelo sistema WIM.

Para analisar os dados de pesagens dos veículos comerciais que circulam na BR 290/RS e determinar o seu real carregamento e possíveis percentuais de sobrecarga está sendo coletada, pelos dois equipamentos em suas respectivas metodologias atuais de serviço, uma grande

quantidade de dados para a formação de um banco representativo que demonstre de forma coerente as reais condições de carregamento imposto à estrutura do pavimento.

Na imagem da Figura 53 está apresentada a localização dos dois postos de controle. O Sistema de pesagem em movimento HS-WIM está instalado no km 72 PS, e posteriormente no km 65 PS encontra-se em operação o Posto de Pesagem Veicular Móvel que realiza o controle de cargas transportadas pela rodovia, posto este no qual foram realizados os acompanhamentos e a coleta de dados para a realização do presente estudo.

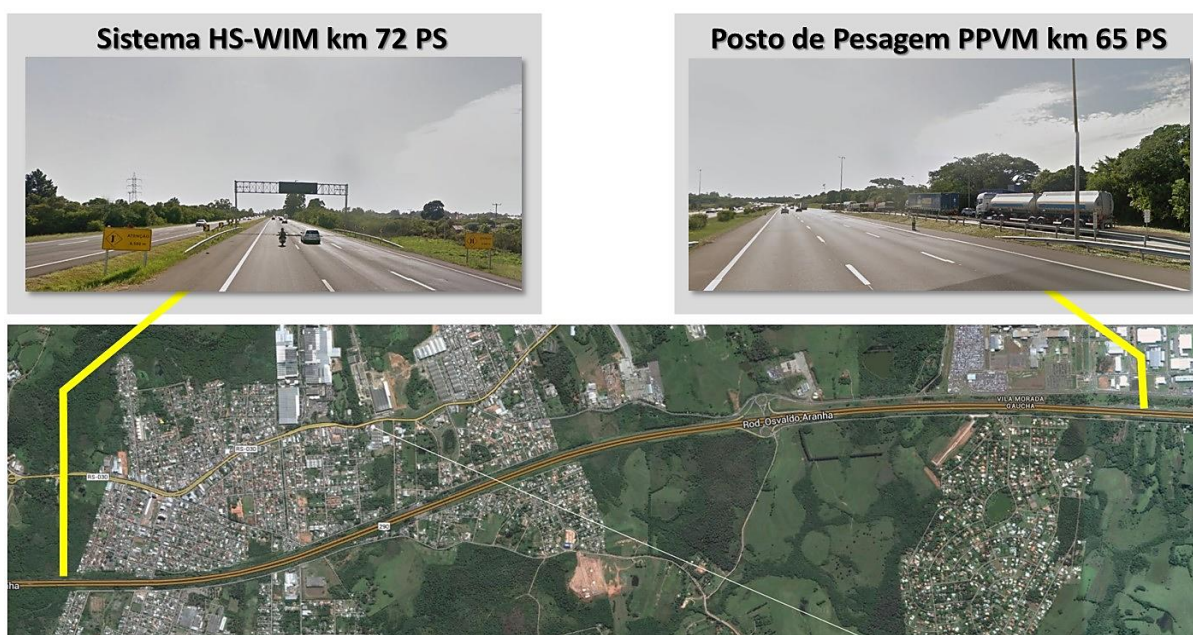


Figura 53 – Localização dos postos de controle e coleta de dados de pesagem (Google, 2014)

3.4 Identificação e Simulação de Distintos Cenários de Espectros de Carga

Para a organização dos dados de tráfego coletados pelo Sistema WIM e posterior realização das análises de desempenho, foi necessária a estruturação do banco de dados de pesagens WIM, a imagem da Figura 54 a seguir representa a tabela de equivalências de classes e os agrupamentos de eixos desenvolvida.

O grande desafio para a definição do espectro de cargas e os carregamentos nos eixos foi encontrar uma forma otimizada de organizar os dados brutos coletados pelo sistema WIM (número de eixos, distanciamento entre eixos e carregamentos) para enquadrar as composições de acordo com a classificação necessária, visto que esta etapa não é realizada pelo sistema em sua condição atual, na qual o mesmo não realizada uma classificação dos dados conforme necessidade requerida.

A definição dos carregamentos praticados por eixos ou grupos de eixos no tráfego analisado (eixos simples – ESRS + ESRD e eixos em tandem – ETD e ETT) e a posterior verificação da consistência dos dados para determinação dos ALF (*Axle Load Distribution Factors*), dados estes necessários, dentre outras características de tráfego, para a sua completa caracterização e emprego na realização das análises de desempenho foi realizada através de verificações de conformidade para cada grupo definido.

Para obtenção do espectro de cargas e para definição das distribuições de cargas nos respectivos grupos de eixos foi realizada uma adequação organizacional do banco de dados para a implementação de uma classificação conforme necessária para análises no software AASHTOWare (Classificação FHWA).

Adicionalmente aproveitou-se para classificar os dados segundo legislação nacional, conforme tabela de equivalência de classes e agrupamento de eixos apresentada na Figura 54, na qual estão apresentados os veículos, segundo classificação DNIT através de composições segundo Manual de Estudo de Tráfego do DNIT - Publicação IPR-723 (2006), das classes de maior representatividade do atual tráfego da rodovia em estudo.

Nesta classificação dá-se grande importância ao grupo de eixos e distanciamento entre eixos, conforme pode ser visualizado na tabela desenvolvida. Para a definição do espectro de cargas e dos níveis de carregamento juntamente com os excessos de cargas nos grupos de eixos são utilizados os dados brutos fornecidos pelo sistema WIM, principalmente de número de eixo, sua localização e seus distanciamentos em relação aos demais eixos, além da sua carga.

Todo este processo foi realizado através do desenvolvimento de uma rotina de programação através de uma linguagem de pesquisa declarativa padrão para um banco de dados relacional (base de dados relacional) pela utilização da *Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada (SQL SERVER).

Para a análise dos dados coletados empregou-se dentro do SQL SERVER a *Data Query Language* (DQL), ou Linguagem de Consulta de Dados. Embora tenha apenas um comando, a DQL é a parte da SQL mais utilizada.

Relacionado especificamente ao tráfego, para que seja possível o emprego do software de previsão de desempenho da AASHTO, tem-se a necessidade de se dispor dos dados conforme classificação FHWA composto por 13 classes conforme apresentado na Figura 55.

Classe FHWA	Sub-Clas FHWA	Classe DNIT	DistEixo 0102	DistEixo 0203	DistEixo 0304	DistEixo 0405	DistEixo 0506	DistEixo 0607	DistEixo 0708	DistEixo 0809	Grupo Eixo 1	Grupo Eixo 2	Grupo Eixo 3	Grupo Eixo 4	Grupo Eixo 5
4	1	2CB	>2400								ESRS	ESRD			
4	2	3BC	>2400	<2400							ESRS	ETD			
5	-	2CB	>2400								ESRS	ESRD			
6	-	3C	>2400	<2400							ESRS	ETD			
7	-	4C	>2400	<2400	<2400						ESRS	ETT			
8	1	2S1	>2400	>2400							ESRS	ESRD	ESRD		
8	2	2S2	>2400	>2400	<2400						ESRS	ESRD	ETD		
8	3	3S1	>2400	<2400	>2400						ESRS	ETD	ESRD		
8	4	2C2	>2400	>2400	>2400						ESRS	ESRD	ESRD	ESRD	
9	1	3S2	>2400	<2400	>2400	<2400					ESRS	ETD	ETD		
9	2	3I2	>2400	<2400	>2400	>2400					ESRS	ETD	ESRD	ESRD	
9	3	2S3	>2400	>2400	<2400	<2400					ESRS	ESRD	ETT		
9	4	2I1	>2400	>2400	>2400	<2400					ESRS	ESRD	ESRD	ETD	
10	1	3S3	>2400	<2400	>2400	<2400	<2400				ESRS	ETD	ETT		
11	-	2I3	>2400	>2400	>2400	>2400					ESRS	ESRD	ESRD	ESRD	ESRD
12	1	2N4	>2400	>2400	<2400	>2400	>2400				ESRS	ESRD	ETD	ESRD	ESRD
12	2	3I3	>2400	<2400	>2400	>2400	>2400				ESRS	ETD	ESRD	ESRD	ESRD
12	3	3I1	>2400	<2400	>2400	>2400	<2400				ESRS	ETD	ESRD	ETD	
12	4	2R4	>2400	>2400	<2400	>2400	<2400				ESRS	ESRD	ETD	ETD	
13	1	3N4	>2400	<2400	>2400	<2400	>2400	>2400			ESRS	ETD	ETD	ESRD	ESRD
13	2	3D4	>2400	<2400	>2400	<2400	>2400	<2400			ESRS	ETD	ETD	ETD	
13	3	3M6	>2400	<2400	>2400	<2400	<2400	>2400	<2400	<2400	ESRS	ETD	ETT	ETT	
13	4	3D6	>2400	<2400	>2400	<2400	>2400	<2400	>2400	<2400	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD

Figura 54 – Equivalências de classes e agrupamentos de eixos














Classe 1 – Motos (2 eixos, 2 ou 3 pneus)	
Classe 2 – Carros de Passeio (2 eixos, podem ter trailers de um ou dois eixos)	
Classe 3 – Pickups, Utilitários e Vans (2 eixos, 4 pneus simples, podem ter trailers de um ou dois eixos)	
Classe 4 – Ônibus (2 ou 3 eixos – corpo rígido)	
Classe 5 – Caminhão de Corpo Rígido 2 eixos (2 eixos, 6 pneus – ESRD atrás)	
Classe 6 – Caminhão de Corpo Rígido 3 eixos	
Classe 7 – Caminhão de Corpo Rígido de 4 ou mais eixos	
Classe 8 – Caminhão Articulado de 3 ou 4 eixos	
Classe 9 – Caminhão Articulado de 5 eixos	
Classe 10 – Caminhão Articulado de 6 ou mais eixos	
Classe 11 – Caminhão Multi-articulado de 5 ou menos eixos	
Classe 12 – Caminhão Multi-articulado de 6 eixos	
Classe 13 – Caminhão Multi-articulado de 7 eixos	

Figura 55 – Tabela de Classificação FHWA

O comando SELECT permite especificar uma consulta ("*query*") como uma descrição do resultado desejado. Esse comando é composto de várias cláusulas e opções, possibilitando elaborar consultas das mais simples às mais elaboradas dentro do banco de dados que se quer analisar. Dessa forma foi possível, através da tabela de equivalência de classes e agrupamentos de eixos, analisar os carregamentos relacionados às diversas classes de veículos de carga.

Portanto realizou-se uma filtragem dos dados conforme classificação mencionada e apresentada na tabela de equivalência de classes e agrupamento de eixos (Figura 54). Além disso, é realizada para cada classe de veículos pesados, ou seja, classes 4 a 13, uma associação com a classificação nacional do DNIT.

Para que essa conversão seja a mais ajustada possível, as classes foram agrupadas segundo as características de agrupamento de eixos, na maioria dos casos foram estipuladas subclasses FHWA para que a classificação pudesse abranger a grande gama de composições nacionais, classificação esta que diferem em alguns casos da classificação realizada pela FHWA.

Após estabelecimento dos critérios de classificação dos dados de tráfego coletados pelo sistema WIM e programação da rotina para associação das classes e definição dos grupos de eixos, essas informações foram incorporadas ao banco de dados associando-as às leituras realizadas, conforme apresentado na estruturação do banco de dados da Figura 56 e Figura 57.

Com a associação dos grupos de eixos e suas respectivas cargas procedeu-se com a definição da distribuição de cargas dentro das faixas de carregamento (ALF) conforme necessidade do software, para cada classe de veículos através de rotinas de Linguagem de Consulta Estruturada "*Structured Query Language*" através do SQL SERVER.

Os grupos de eixos verificados, dentro de seus respectivos intervalos de carregamentos, desde a carga mínima até a carga máxima são apresentados no Tabela 21 a seguir.

Tabela 21 - Resumo das faixas de carregamentos verificados

Grupo de Eixo	Carga Mínima (Kg)	Carga Máxima (Kg)	Intervalo de verificação (Kg)
ESRS	1.000	20.000	500
ESRD	1.000	20.000	500
ETD	2.000	40.000	1.000
ETT	4.500	49.500	1.500
ETQ*	4.500	49.500	1.500

* ETQ (Eixo Tandem Quádruplo) – tandem com quatro eixos não existente na frota nacional

VBVID	VehicleClass30	VehicleClassFHWA	VehicleWeight	VehicleAxes	VehicleLength	TotalVehicleAxleWeight	VehicleAxleWeight01	VehicleAxleWeight02	VehicleAxleWeight03	VehicleAxleWeight04	VehicleAxleWeight05
143712	17	9	28000	5	12600	28000	4100	6200	5500	5600	6600
143715	7	6	9100	3	7600	9100	1900	3900	3300	0	0
143721	12	12	32400	6	19000	32400	5000	6600	6500	4800	4700
143722	6	5	6900	2	12300	6900	2800	4100	0	0	0
143725	12	12	35600	6	18500	35600	5800	7600	7400	6000	4200
143730	17	9	10800	5	17800	10800	3600	2300	1400	1600	1900
143734	18	10	30400	6	15500	30400	3000	5600	4600	5900	5600
143738	6	5	4720	2	7400	4720	2380	2340	0	0	0
143746	18	10	38400	6	13300	38400	3300	9700	3900	7400	7000
143751	18	10	38000	6	15200	38000	5000	6700	5800	5900	6800
143752	7	6	17500	3	9200	17500	4200	7600	5700	0	0
143761	14	8	7600	4	12300	7600	2000	3000	1500	1100	0
143762	16	9	14100	5	17400	14100	4300	2300	2500	2500	2500
143765	7	6	7000	3	6100	7000	2300	2900	1800	0	0
143767	7	6	24200	3	7200	24200	5200	9700	9300	0	0
143768	6	5	4400	2	7100	4400	1800	2600	0	0	0
143769	6	5	2510	2	7300	2510	670	1840	0	0	0
143771	6	5	5100	2	6800	5100	2800	2300	0	0	0
143773	14	8	14400	4	12700	14400	3900	5600	3100	1800	0
143774	6	5	4100	2	8700	4100	1300	2800	0	0	0

VehicleAxleDistance0203	VehicleAxleDistance0304	VehicleAxleDistance0405	VehicleAxleDistance0506	VehicleAxleDistance0607	VehicleAxleDistance0708	VehicleAxleDistance0809	VehicleAxleDistance0910	VehicleAxleDistance0911
3500	4100	1250	1200	0	0	0	0	0
4800	1250	0	0	0	0	0	0	0
4750	1350	4800	4500	1150	0	0	0	0
5950	0	0	0	0	0	0	0	0
4550	1300	4850	4450	1200	0	0	0	0
4200	7250	1250	1200	0	0	0	0	0
3500	1200	5600	1200	1200	0	0	0	0
4000	0	0	0	0	0	0	0	0
4500	1350	3000	1200	1200	0	0	0	0
3250	1250	5550	1200	1200	0	0	0	0
5100	1250	0	0	0	0	0	0	0
4450	4300	1200	0	0	0	0	0	0
3500	1350	7500	2350	0	0	0	0	0
3700	1250	0	0	0	0	0	0	0
3350	1300	0	0	0	0	0	0	0
4200	0	0	0	0	0	0	0	0
4850	0	0	0	0	0	0	0	0
3800	0	0	0	0	0	0	0	0
3500	5450	1250	0	0	0	0	0	0
5650	0	0	0	0	0	0	0	0

Timestamp	ChassiCode	VehicleLane	VehicleSpeed	VehicleClass8	VehicleClass4	VehicleClass2	VehicleSubClassFHWA	VehicleClassDNIT	TypeAxleGroup1	TypeAxleGroup2	TypeAxleGroup3	TypeAxleGroup4
2013-03-12 14:06:40.0000000	23	1	81	H	C	B	3	253	ESRS	ESRD	ETT	0
2013-03-12 14:06:55.7000000	20	2	82	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0
2013-03-12 14:07:35.0000000	18	1	82	G	C	B	3	3I1	ESRS	ETD	ESRD	ETD
2013-03-12 14:07:36.0000000	60	2	89	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0
2013-03-12 14:07:55.0000000	29	1	76	G	C	B	3	3I1	ESRS	ETD	ESRD	ETD
2013-03-12 14:08:23.9000000	28	1	80	H	C	B	3	253	ESRS	ESRD	ETT	0
2013-03-12 14:08:40.6000000	38	2	84	H	C	B	1	3S3	ESRS	ETD	ETT	0
2013-03-12 14:09:10.4000000	31	1	74	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0
2013-03-12 14:10:04.1000000	31	1	78	H	C	B	1	3S3	ESRS	ETD	ETT	0
2013-03-12 14:10:30.8000000	27	1	79	H	C	B	1	3S3	ESRS	ETD	ETT	0
2013-03-12 14:10:31.6000000	26	2	84	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0
2013-03-12 14:11:25.4000000	23	2	80	H	C	B	2	252	ESRS	ESRD	ETD	0
2013-03-12 14:11:29.5000000	43	2	78	H	C	B	1	3S2	ESRS	ETD	ETD	0
2013-03-12 14:11:54.5000000	22	1	67	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0
2013-03-12 14:12:27.9000000	26	1	77	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0
2013-03-12 14:12:35.1000000	31	1	78	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0
2013-03-12 14:12:36.3000000	23	1	79	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0
2013-03-12 14:12:41.8000000	25	1	90	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0
2013-03-12 14:12:44.9000000	30	1	79	H	C	B	2	252	ESRS	ESRD	ETD	0
2013-03-12 14:12:52.3000000	18	1	89	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0

VehicleSpeed	VehicleClass8	VehicleClass4	VehicleClass2	VehicleSubClassFHWA	VehicleClassDNIT	TypeAxleGroup1	TypeAxleGroup2	TypeAxleGroup3	TypeAxleGroup4	TypeAxleGroup5	TypeAxleGroup6	year	month
81	H	C	B	3	253	ESRS	ESRD	ETT	0	0	0	2013	3
82	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0	0	0	2013	3
82	G	C	B	3	3I1	ESRS	ETD	ESRD	ETD	0	0	2013	3
89	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0	0	0	2013	3
76	G	C	B	3	3I1	ESRS	ETD	ESRD	ETD	0	0	2013	3
80	H	C	B	3	253	ESRS	ESRD	ETT	0	0	0	2013	3
84	H	C	B	1	3S3	ESRS	ETD	ETT	0	0	0	2013	3
74	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0	0	0	2013	3
78	H	C	B	1	3S3	ESRS	ETD	ETT	0	0	0	2013	3
79	H	C	B	1	3S3	ESRS	ETD	ETT	0	0	0	2013	3
84	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0	0	0	2013	3
80	H	C	B	2	252	ESRS	ESRD	ETD	0	0	0	2013	3
78	H	C	B	1	3S2	ESRS	ETD	ETD	0	0	0	2013	3
67	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0	0	0	2013	3
77	F	C	B	-1	3C	ESRS	ETD	0	0	0	0	2013	3
78	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0	0	0	2013	3
79	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0	0	0	2013	3
90	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0	0	0	2013	3
79	H	C	B	2	252	ESRS	ESRD	ETD	0	0	0	2013	3
89	F	C	B	-1	2C	ESRS	ESRD	0	0	0	0	2013	3

Figura 56 – Estrutura do banco de dados gerado para análise do tráfego

The figure displays three screenshots of a data analysis software interface, showing different tables from a database. The first screenshot shows a table with columns: VBVID, VehicleClass3, VehicleClassFHWA, VehicleWeight, VehicleAxes, VehicleLength, TotalVehicleAxeWeight, VehicleAxeWeight01, VehicleAxeWeight02, VehicleAxeWeight03, VehicleAxeWeight04, and VehicleAxeWeight05. The second screenshot shows a table with columns: VehicleAxeDistance0102, VehicleAxeDistance0203, VehicleAxeDistance0304, VehicleAxeDistance0405, VehicleAxeDistance0506, VehicleAxeDistance0708, VehicleAxeDistance0809, and VehicleAxeDistance0910. The third screenshot shows a table with columns: Timestamp, ChassiCode, VehicleLane, VehicleSpeed, VehicleClass8, VehicleClass9, VehicleClass10, VehicleClass11, VehicleClass12, VehicleSubClassFHWA, VehicleClassDNIT, TypeAxeGroup1, TypeAxeGroup2, TypeAxeGroup3, TypeAxeGroup4, TypeAxeGroup5, TypeAxeGroup6, year, and month. A red box highlights the first table, a red cross and arrow highlight the second, and a green arrow points to the third.

Figura 57 – Estrutura do banco de dados gerado para análise do tráfego

A partir do banco de dados gerado pelo monitoramento contínuo da frota comercial da BR-290 através do equipamento WIM realizou-se a montagem de distintos cenários com espectros de carga para posterior avaliação de sua influência nos parâmetros de desempenho da rodovia.

Para análise dos dados disponíveis no banco da Concessionária, no qual encontram-se armazenados dados dos equipamentos de contagem e classificação de tráfego e do sistema WIM, foi necessário realizar um particionamento das tabelas para extração e criação de uma nova tabela somente dos dados do sistema WIM (EquipmentID 8), proporcionando dessa forma uma maior agilidade nas consultas via MS SQL Server.

Após esta etapa iniciaram-se as análises de dados, através da verificação de consistência dos mesmos, quantificação do volume de dados disponíveis e posterior análise das cargas por grupos de eixos.

A análise do banco de dados para caracterização de carregamentos encontrados nos Grupos de Eixos (eixos simples de roda simples - ESRS, eixos simples de rodas duplas - ESRD, eixos em tandem duplo – ETD, eixos em tandem triplo - ETT) foi realizada após montagem de uma linguagem de consulta de dados (*Data Query Language*, DQL) no MS SQL Server para classificação e agrupamento dos resultados de cargas e quantidade de veículos e eixos armazenados durante o período de análise. Os carregamentos foram divididos em faixas de cargas para cada grupo de eixo analisado e posteriormente definidos os percentuais de eixos dentro da legislação e dos eixos sobrecarregados.

Para análise das cargas praticadas foram utilizados os dados referentes ao ano de 2014. Fez-se uma distribuição de quantidade de eixos dentro de determinados percentuais de carga preestabelecidos. Valores limites mínimos e máximos de carga foram estabelecidos com o objetivo de eliminar dados espúrios, ou seja, aquele dado que por algum motivo técnico ou falha na leitura do sistema pode não corresponder a carga realmente praticada

A partir do banco de dados gerado pelo monitoramento da frota comercial da BR-290/RS através do equipamento WIM realizou-se a montagem de quatro distintos cenários com espectros de carga:

- **Cenário I:** Neste primeiro cenário, denominado como CENÁRIO IDEAL, é considerado o volume total de veículos comerciais registrado no período de análise. No que se refere aos carregamentos da frota, desconsideram-se as cargas que excedem a carga limite para os eixos ou grupos de eixos (ESRS, ESRD, ETD e ETT).

- **Cenário II:** Neste cenário, são consideradas as cargas da composição do tráfego dentro do LIMITE DE TOLERÂNCIA de 10% nos eixos ou grupos de eixos segundo determinado pela Resolução 240/2014 do CONTRAN.
- **Cenário III:** No segundo cenário, denominado como CENÁRIO REAL, é considerado o volume total de veículos comerciais registrado no período de análise e os carregamentos são consideradas as cargas reais praticadas, incluindo as cargas que excedem a carga limite para os eixos ou grupos de eixos.
- **Cenário IV:** No último cenário analisado consideraram-se cargas acima dos limites legais e SUPERIORES ao tráfego REAL, com sobrecargas de 20% nos eixos e grupos de eixos da frota. Considerou-se uma sobrecarga em maiores níveis das cargas reais observadas como o objetivo de verificar seu efeito danoso no desempenho da estrutura do pavimento nestas condições extremas.

Após a definição destes diferentes cenários de espectro de carga, procedeu-se com a organização dos dados de pesagem, definição de classes, definição dos carregamentos conforme necessidade dos softwares de análise.

Conforme descrito na revisão bibliográfica, optou-se por dois softwares para a análise destes cenários, sendo eles, o software de análise mecânica-empírica desenvolvido pela AASHTO (AASHTOWare – Pavement ME Design).

Os dados de tráfego com suas principais características foram obtidos por meio de consultas realizadas de forma organizada através de rotinas de programação (Data Query Language, DQL no MS SQL Server) de consultas ao banco de dados do equipamento de pesagem dinâmica.

Os principais dados de tráfego necessários para avaliação de desempenho empregando o software da AASHTO (AASHTOWare) são caracterizados pelos *Fatores de Ajuste do Volume do Tráfego (Traffic Volume Adjustment Factors)*. Estes fatores de ajuste do volume do tráfego são caracterizados como: Fatores de ajuste mensal (*Monthly Adjustment Factors*); Distribuição de classe de veículo (*Vehicle Class Distribution*); Distribuição horária do tráfego de caminhões (*Hourly Truck Traffic Distribution*); Fatores de crescimento do tráfego (*Traffic Growth Factors*). Estes fatores são apresentados nesta fase somente de forma expositiva pois os mesmos já foram discutidos na revisão bibliográfica.

Na Figura 58 é possível observar as características da estrutura do pavimento e dos seus materiais constituintes, em conformidade com a estrutura dos trechos monitorados anteriormente apresentados. Para as condições gerais de análise foram considerados os seguintes parâmetros: limites de 20% de área trincada no revestimento asfáltico; IRI inicial de 1,5m/km e limite de IRI de 2,7m/km; deformação total da estrutura de 19mm e limite de 5,0mm de deformação permanente do revestimento asfáltico (limites adotados em consonância com o PER – Plano de Exploração da Rodovia).

As principais características da estrutura e do tráfego empregadas para a realização das análises de desempenho no AASHTOWare, no caso, as análises em andamento para verificação dos principais cenários de espectro de cargas considerados, espectro de cargas IDEAL – Cenário I e espectro REAL – II, podem ser observadas na mesma imagem.

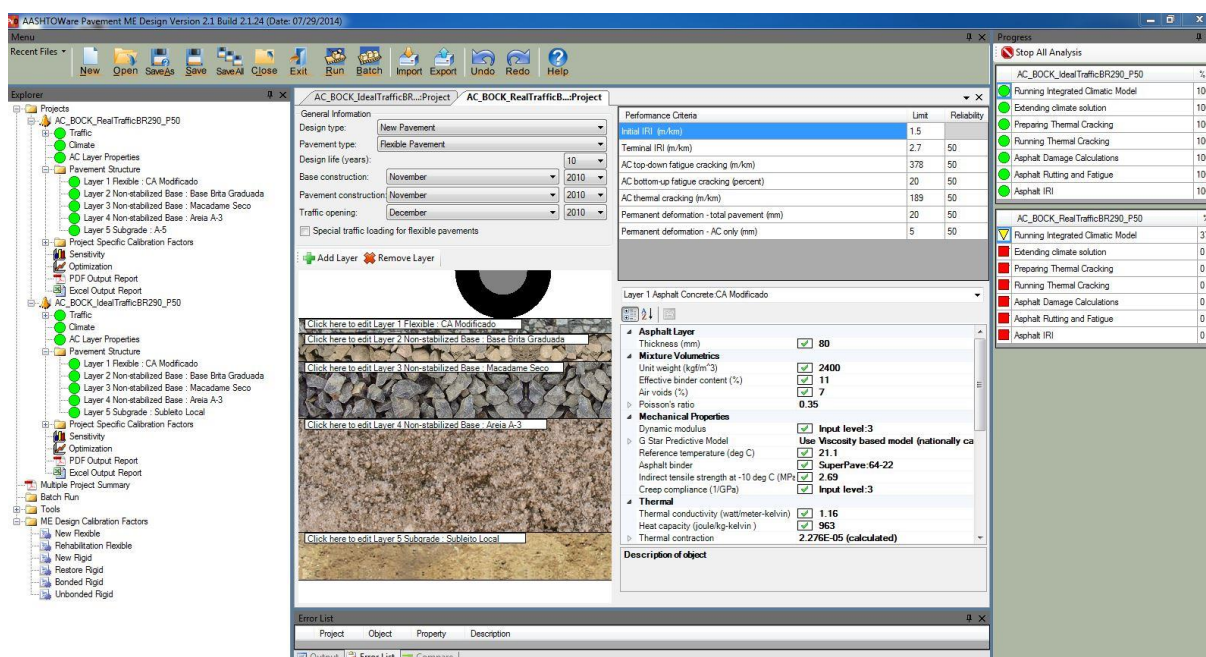


Figura 58 – Tela do software AASHTOWare Pavement ME Design com estrutura do pavimento e condições gerais de análise

Os principais dados de tráfego gerados através do banco de dados do Sistema WIM e empregados nas análises de desempenho são apresentados tela do software representada na Figura 59 na qual são observadas as distribuições de veículos de cargas por classe, os fatores de carregamento por eixo, além de características gerais do tráfego solicitante da estrutura em análise.

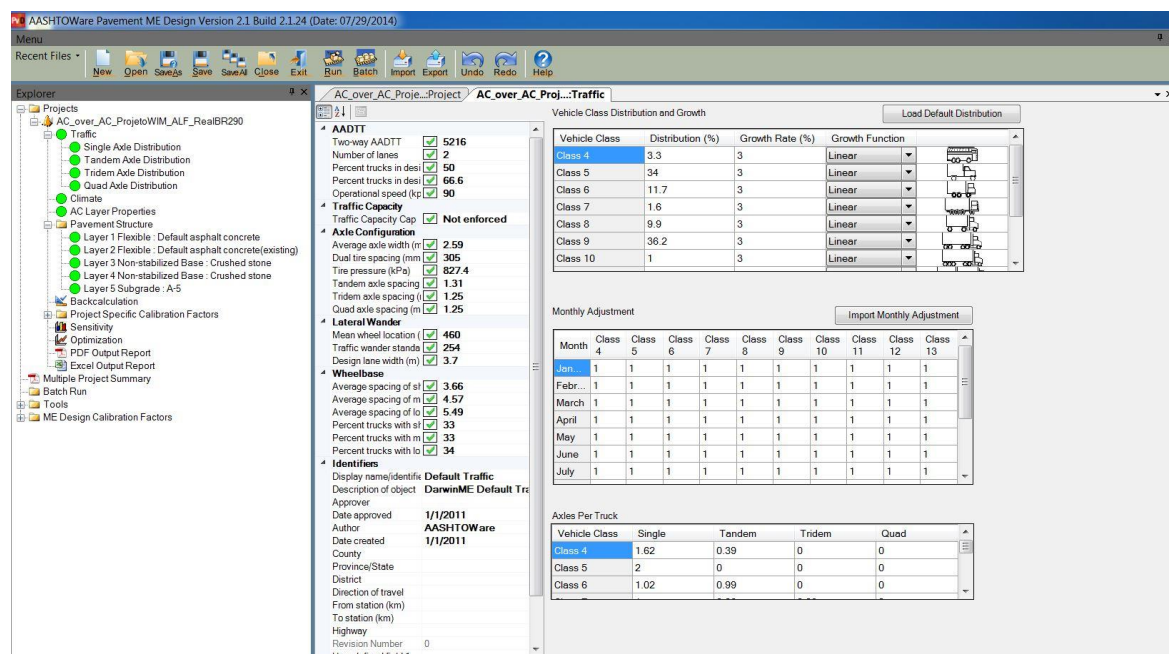


Figura 59 – Definição das condições de tráfego conforme análise realizada anteriormente

Além dos fatores mencionados acima, um importante passo para verificação do desempenho do pavimento frente ao cenário real de cargas e posteriormente os demais cenários foi o desenvolvimento de uma tabela com os fatores de distribuição de cargas.

As considerações de tráfego conforme o manual da AASHTO usando no AASHTOWare são apresentadas na Figura 60. Observa-se que para as avaliações são necessários dados específicos para o local de análise. No presente caso foram usados os dados obtidos por um sistema WIM para obter a distribuição das cargas por eixo (*Axle Load Distribution*).

Estes dados são de grande importância para atender às necessidades do software que exige que se conheça a distribuição estatística das cargas para cada tipo de eixo: eixos simples (ESRS e ESRD) e eixos em tandem duplo e triplo (ETD e ETT) e eixos em tandem quádruplo (inexistente na frota brasileira). Para tanto, é necessário se valer do banco de dados do WIM e fazer uma coerência entre os vários veículos obtendo-se a distribuição estatística dos mesmos.

Para que se pudesse fazer as considerações da sobrecarga, simplificou-se todos os veículos em termos da existência de ESRS, ESRD, ETD e ETT. De posse do VDM relatado para cada veículo e sua silhueta, foi determinado o total de eixos de cada tipo. O número de eixos simples na dianteira dos veículos comerciais, remete a determinação do número de veículos na frota. E o número de cada um dos outros eixos, equacionou o percentual do total de eixos.

Isto é necessário para viabilizar a composição da frota e sua segmentação conforme o total de cargas para compor o ALF (Brito & Specht, 2013).

Site Specific Traffic Inputs
<ul style="list-style-type: none"> • Initial Two Way Average Annual Daily Truck Traffic (AADTT) • Percent Trucks in Design Lane • Percent Trucks in Design Direction • Operational Speed • Truck Traffic Growth
WIM Traffic Data
<ul style="list-style-type: none"> • Axle Load Distribution • Normalized Truck Volume Distribution • Axle Load Configurations • Monthly Distribution Factors • Hourly Distribution Factors
Other Inputs
<ul style="list-style-type: none"> • Dual Tire Spacing • Tire Pressure • Lateral Wander of Axle Loads

Figura 60 – Dados de entrada de tráfego no AASHTOWare (Brito & Specht, 2013)

Considerando as classes de veículos do FHWA realizou-se a distribuição das cargas em função dos intervalos de carga definidos no software (Figura 61).

Month	Class	Total	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
January	4	100	6.11	4.8	9.96	13.45	11.09	10.13	11.44	9	7.34	4.8	2.97	2.45	2.18	1.4	0.79
January	5	100	7.49	8.67	11.87	12.56	11.16	9.52	8.27	6.92	5.6	4.2	3.14	2.43	1.96	1.5	1.14
January	6	100	1.56	3.82	7.56	10.23	12.04	12.61	12.4	10.98	8.7	6.42	4.46	2.9	1.93	1.29	0.93
January	7	100	7.44	5.43	5.52	9.6	12.45	11.19	10.16	7.96	6.84	5.85	4.45	2.34	2.34	2.11	1.22
January	8	100	1.89	2.96	4.96	7.2	11.15	13.92	13.82	11.61	8.96	6.69	4.93	3.36	2.31	1.68	1.2
January	9	100	0.3	1.05	2.98	3.99	5.53	7.86	9.76	10.25	9.53	8.17	6.72	5.79	5.29	4.91	4.25
January	10	100	0.2	1.17	3.98	5.44	6.58	9.65	13.2	15.01	14.02	10.44	7.35	4.27	2.74	1.93	1.43
January	11	100	3.96	3.51	6.01	9.39	11.45	10.92	9.11	7.25	5.71	5.4	5.16	4.55	3.96	3.45	2.63
January	12	100	0.93	1.17	1.93	1.74	1.94	2.79	3.79	5.07	6.77	8.49	10.46	10.8	10.62	9.29	7.14
January	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 61 – Exemplo de definição das condições de carregamento conforme análise realizada para geração dos ALF (*Axle Load Distribution Factors*)

A geração dos ALF (*Axle Load Distribution Factors*) foi um dos principais produtos da presente pesquisa. Após a definição de todos os parâmetros de entrada requeridos pelo software iniciou-se a análise dos resultados de desempenho gerados em função dos cenários de espectro de cargas estabelecidos, cenário Ideal e cenário Real. Os resultados destas análises são apresentados a seguir de forma comparativa e agrupados em função do tipo de dano avaliado.

De forma a resumir todo o processo de obtenção dos dados de tráfego através do sistema WIM, compilação e análise dos dados e posterior análise de desempenho da estrutura em função dos distintos cenários de carregamentos apresenta-se uma representação esquemática na Figura 62.

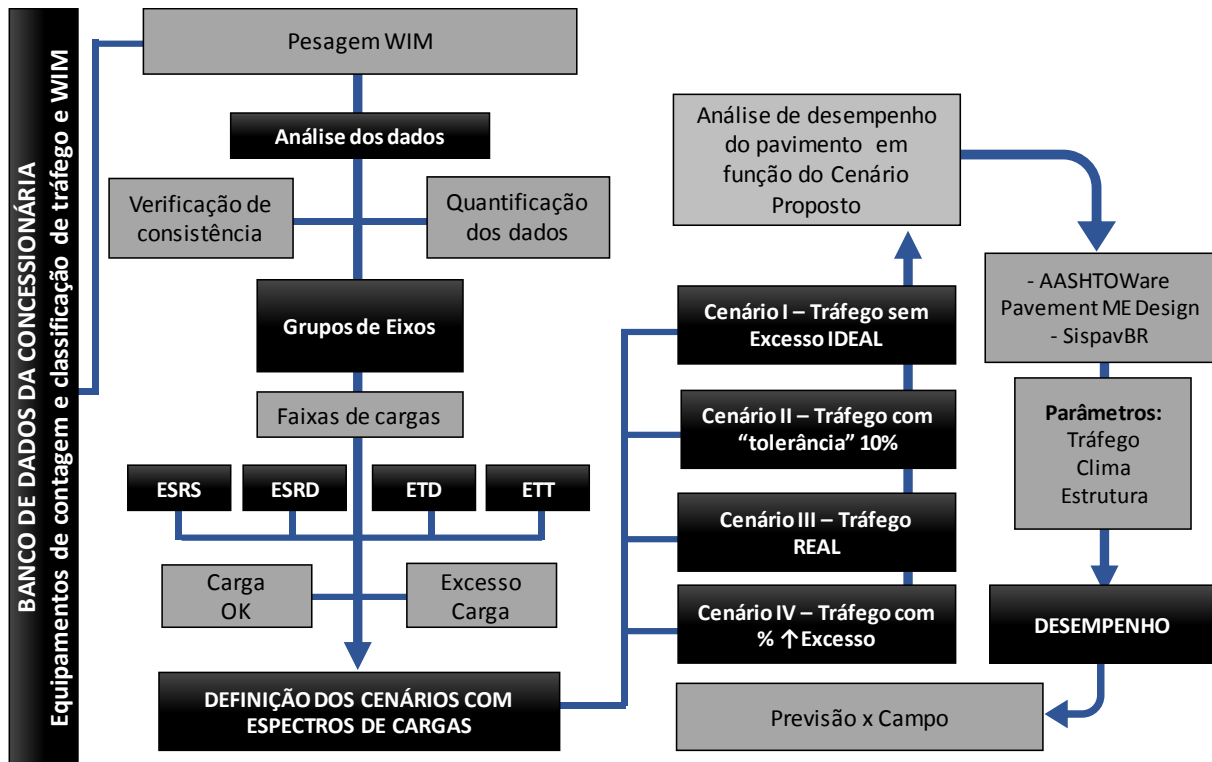


Figura 62 – Representação esquemática da análise de dados realizada para definição dos cenários de espectro de cargas e avaliação de desempenho

4 DEFINIÇÃO E ANÁLISE DO TRÁFEGO SOLICITANTE

A análise dos dados da presente tese será dividida em dois distintos momentos, primeiramente serão apresentadas as análises realizadas em função do tráfego solicitante dos trechos monitorados e em um segundo momento, no Capítulo 5, serão apresentadas as análises do acompanhamento de desempenho dos trechos e o comparativo entre as curvas de desempenho observadas em campo e aquelas obtidas a partir das análises realizadas considerando os distintos cenários de carregamentos, simulados através de análises de desempenho.

Através de um conhecimento detalhado de fatores relacionados à qualidade dos materiais, processos construtivos e características da estrutura do pavimento é possível analisar de forma detalhada os mecanismos de degradação predominantes associados ao tráfego, com atenção especial para a influência da intensidade do carregamento (sobrecargas) e a ação climática sobre a estrutura analisada.

Sabendo-se as magnitudes reais do tráfego que solicita um pavimento pode-se estabelecer uma relação entre a influência do tráfego com excesso de cargas, problema este de grande relevância na degradação prematura dos pavimentos rodoviários, e o surgimento dos mecanismos de degradação e sua futura evolução.

Para a análise do tráfego nos trechos monitorados, ou seja, nos trechos da BR-290/RS Freeway e da BR-448/RS, foram realizadas considerações distintas. Na primeira foram obtidos dados mais completos do espectro de cargas, conforme mencionado na metodologia; já na segunda rodovia não foi possível a aquisição de dados dos carregamentos do tráfego, tendo-se apenas dados de classificação do tráfego. Estas considerações distintas de tráfego se devem ao fato de, durante o período de pesquisa, não ter sido possível um acompanhamento igualitário de cargas solicitantes do tráfego em ambas as rodovias.

No que se refere ao monitoramento dos trechos implantados, são apresentados e analisados no Capítulo 5 os dados de evolução dos parâmetros funcionais e estruturais de quatro trechos monitorados, dois na BR-290/RS com 5 e 6 anos de acompanhamento e dois na BR-448/RS com 2 anos de monitoramento.

A interpretação e análise dos resultados obtidos na avaliação do tráfego solicitante será apresentada de forma sequencial nos itens a seguir.

No decorrer do presente capítulo serão apresentados os principais resultados dos estudos de tráfego realizados. Cada conjunto de dados obtido, conforme mencionado na metodologia, será apresentado de forma organizada para cada uma das rodovias em questão.

Relembrando, conforme metodologia proposta, nos trechos da BR-290/RS a avaliação do tráfego foi realizada através de distintas metodologias, compreendendo duas fases de extrema importância, sendo elas:

- Classificação da frota de veículos comerciais circulantes na rodovia através de dados históricos da Praça de Pedágio (2013-2016) localizada nas proximidades dos trechos monitorados (km19: Pista Sul) – classificação dados para estimativa do N_{anual} ;
- Análise das cargas transportadas pela rodovia através da implantação de um sistema de pesagem em movimento (WIM). Nesta fase fez-se a determinação do espectro de cargas real da rodovia, dados com os quais foi possível determinar os carregamentos médios dos eixos ou grupos de eixos dos veículos de carga que transitam na rodovia.

Adicionalmente à coleta de dados de carga do sistema WIM, realizou-se um estudo de acompanhamento das pesagens do posto de pesagem localizado na rodovia. Estudo este que serviu para realização de comparativo dos dados coletados pelos distintos métodos de fiscalização, demonstrando vantagens e desvantagens existentes em cada uma das metodologias, além de potencialidades e melhorias necessárias em metodologias emergentes que podem facilitar o controle de cargas nas rodovias brasileiras.

No estudo de tráfego voltado para os trechos implantados na BR-448/RS não foi possível a realização de um acompanhamento das cargas transportadas. Esta limitação se deve a limitações de projetos e inexistência de fiscalização de cargas no trecho, recém implantado.

Neste contexto, realizou-se um monitoramento do tráfego circulante na rodovia através de videomonitoramento para avaliação da composição da frota e determinação do N_{anual} dos trechos em monitoramento. O videomonitoramento⁶ foi realizado anualmente, através de filmagens do fluxo de veículos por períodos de 16h durante três dias consecutivos, atendendo as restrições mencionadas no Manual de Estudo de Tráfego (DNIT, 2006).

⁶ Videomonitoramento realizado com o importante auxílio da Concepa – Concessionária da BR-290-Freeway

4.1 BR-290/RS - Definição das solicitações de tráfego nos trechos monitorados

4.1.1 Estimativa de Número N (dados da Praça de Pedágio km 19PS)

Conforme mencionado por Mattos (2014), que acompanhou a construção e os primeiros anos de monitoramento dos trechos, as atualizações dos dados de tráfego nos trechos monitorados foram obtidas graças à concessionária da rodovia, a CONCEPA, com dados mensais da praça de pedágio localizada no km 19 da Pista Sul. Foram empregados, para a estimativa do Número N, dados obtidos por Mattos (2014) e atualizações realizadas mensalmente durante os anos de 2013 a 2016.

Após a tabulação, os dados de tráfego, ano a ano, foram analisados, determinando-se volumes médios diários (VMD) para estimativa do número de solicitações de eixo padrão rodoviário (Número N), na pista sul da rodovia BR-290/RS (Tráfego Unidirecional).

Na Figura 63 são apresentados os volumes diários médios referentes a cada mês do ano de 2015 (exemplo). Verifica-se um forte efeito de sazonalidade ao longo do ano quando se trata do total de veículos. No entanto, quando se faz a distinção entre os veículos leves e comerciais percebe-se que o volume é praticamente constante em todos os meses do ano.

Os Volumes Diários Médios de veículos de carga durante os anos de 2013, 2014, 2015 e 2016⁷ variaram entre 2.500 e 3.200 veículos, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 64.

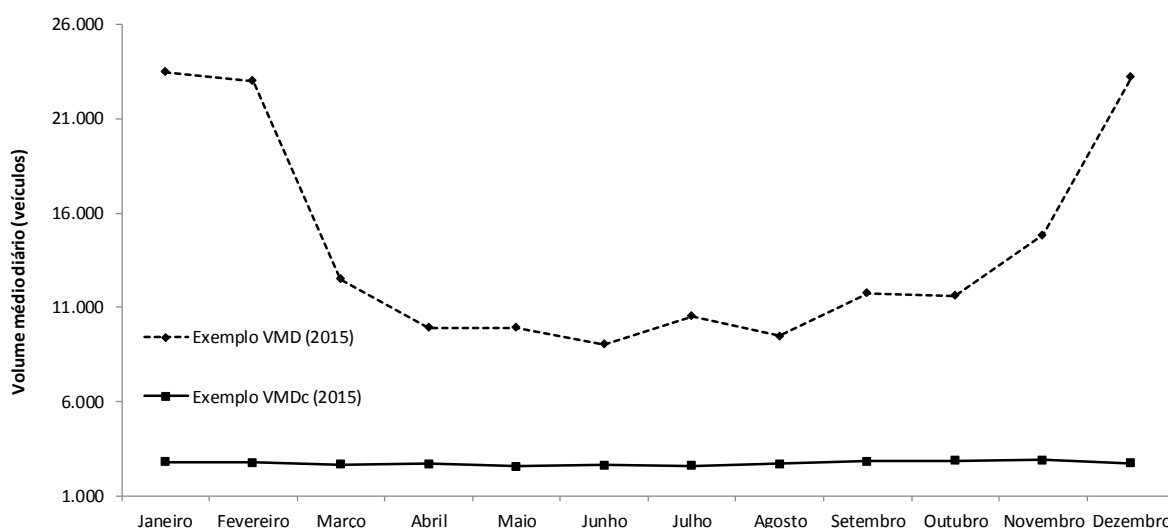


Figura 63 – VMD: Volume Médio Diário de veículos na Pista Sul (km19⁸) no ano de 2015 segundo dados da Concessionária (VMD: Total de veículos e VMDc: veículos comerciais)

⁷ Dados referentes ao primeiro semestre do ano de 2016 (janeiro a junho).

⁸ Tráfego Unidirecional – Pista Sul

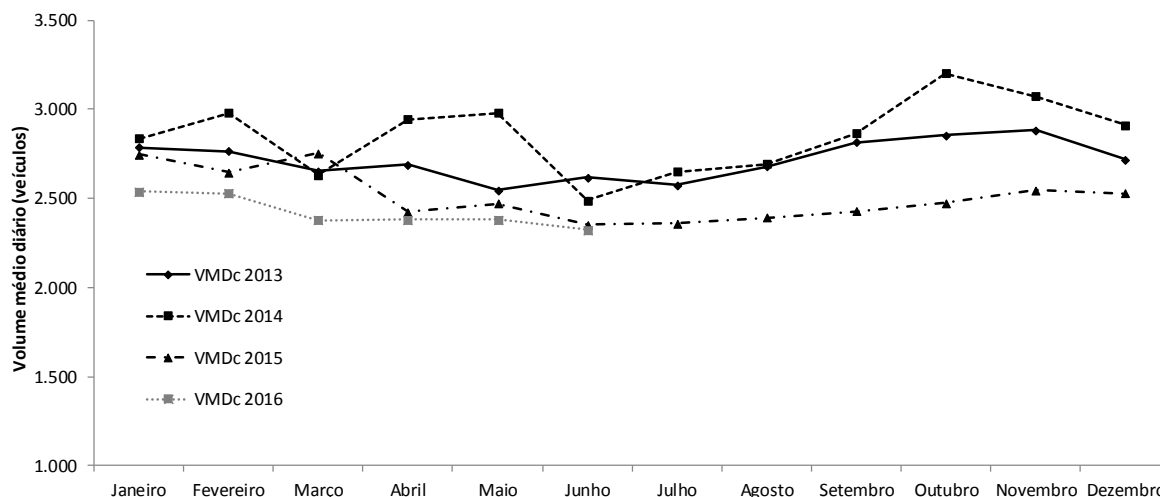


Figura 64 – VMDc: Volume Médio Diário de Veículos Comerciais na Pista Sul (km19⁹) nos anos de 2013, 2014, 2016 e 2016 segundo dados da Concessionária

A média do VMDc, durante o período analisado na presente tese, é de 2.501 caminhões no sentido sul da rodovia (Porto Alegre - Osório), com desvio padrão de 115 caminhões e CV de apenas 4,2%. Importante destacar que existem poucos pontos de desvio de tráfego entre a praça de pedágio e os trechos monitorados. Então, pode-se supor que praticamente todos esses veículos que passaram pelo pedágio também passaram nos trechos monitorados.

Vitorino (2008) relata que o trecho Porto Alegre-Osório da rodovia BR-290/RS apresenta uma taxa de crescimento médio de tráfego de 2,0%. No entanto, para o período analisado foi observada uma taxa média de 5,13% do ano de 2013 para o ano de 2014 e posteriormente um decréscimo de 12% do ano de 2014 para o ano de 2015 (segundo os dados fornecidos pela concessionária). Desse modo, para estimativa do Número N foram utilizados os valores médios anuais de VMDc do período analisado e assim definidas as solicitações de tráfego para os tempos de monitoramento dos trechos em análise.

Devido a que o sistema de aquisição de informação na praça de pedágio segue a tabela de categorização de veículos definida no Manual de Estudos de Tráfego (2006) para definição tarifária, somente é possível classificar os veículos de carga em 5 categorias do DNIT, a saber: 2C, 2S1, 2S2, 2S3 e 3S3. Além destas classes, há uma classificação definida como “outros” na planilha de fluxo diário. A mesma se refere a todos os veículos acima de 6 grupos de rodas (neste caso, por exemplo, um eixo tandem duplo conta como dois grupos de rodas); sendo considerado nesta tese como veículos 3T4 Bi-trem articulado, segundo classificação DNIT.

⁹ Tráfego Unidirecional – Pista Sul

A planilha de fluxo diário classificado, disponibilizada pela concessionária, é apresentada na Tabela 22. O Volume Médio Diário anual (VMDa) apresentado corresponde à média mensal dos dados de tráfego monitorados de segunda a domingo durante os doze meses do ano. É importante ressaltar que para o ano de 2016 consideraram-se apenas dados de janeiro a julho.

Tabela 22 – Planilha de fluxo diário classificado (praça de pedágio P1 Freeway - Concepa)

FLUXO CLASSIFICADO (SEG-DOM) MÉDIA MENSAL - ANUAL PRAÇA P1 - RS - BR-290 - KM-19	Classif. DNIT	Ano 2013	Ano 2014	Ano 2015	Ano 2016
		VMDa	VMDa	VMDa	VMDa *
1 - Automóvel, caminhonete, furgão	-	11.052	8.769	9.782	12.849
2 - Caminhão leve, ônibus caminhão trator e furgão	2C	451	683	504	576
3 - Automóvel com semi-reboque e caminhoneta com semi-reboque	-	95	63	88	91
4 - Caminhão, caminhão trator, caminhão trator com semi-reboque	2S1	686	659	560	617
5 - Automóvel com reboque e caminhoneta com reboque	-	11	11	12	12
6 - Caminhão com reboque, caminhão trator com semi-reboque	2S2	239	198	254	199
7 - Caminhão com reboque, caminhão trator com semi-reboque	2S3	516	450	382	408
8 - Caminhão com reboque, caminhão trator com semi-reboque	3S3	623	684	616	645
9 - Motocicletas, motonetas e bicicletas a motor	-	235	216	198	256
10-Outros	3T4	200	182	193	197

Um dos maiores problemas observados na definição do real tráfego atuante em pavimentos rodoviários, tanto em projetos de manutenção e restauração de pavimentos quanto em projetos de pavimentos novos, é a definição das cargas que os solicitam. Conforme descrito por Mattos (2014), não se obteve, na época de realização de sua tese mencionada, dados atualizados de pesagens ou controles de cargas nos trechos monitorados.

Desta forma, segundo o autor, procedeu-se como é de praxe na maioria dos casos, ou seja, na falta de informações sobre a distribuição de cargas de eixos, mas sabendo-se que ocorre um excesso de carga considerável, considera-se que todos os veículos de carga trafegam com a carga máxima permitida por eixo.

Entende-se, assim, que os veículos que não estão trafegando com carga máxima serão compensados, de certa maneira, pelos que estão com excesso de carga por eixo. Porém, esta consideração não é correta, uma vez que o dano cresce exponencialmente, e não linearmente, com cargas acima da carga padrão.

Na presente tese, para estimativa do número N foram definidos os fatores de veículo (FV) da frota analisada. O FV pode ser expresso em termos dos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO ou do USACE. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 23.

Levando em consideração que no período da noite uma parcela dos veículos de carga trafega mais pela faixa central, ou seja, não passam pela faixa dos trechos monitorados, seguiu-se a mesma metodologia adotada por Mattos (2014), que estimou que 15% do tráfego de veículos

comerciais deva ser reduzido para representar essa parcela de tráfego noturno. Por fim, o número N é calculado pela Equação 1.

$$N = 365.VMDc.P.FV.F_D \quad (1)$$

Onde:

N é número equivalente de passagens do eixo padrão durante o período de projeto;

$VMDc$ é volume médio diário de tráfego comercial médio do período de projeto;

FV é o fator de veículo, pode ser calculado pela AASHTO ou pelo USACE; e

F_D é fator de distribuição de frota por faixa de tráfego, no caso adotou-se 0,85.

Tabela 23 – Estimativa dos fatores de veículo (FV) e dos fatores de carga (FC)

Categoria de Veículos (DNIT)	VMDa ¹⁰	Fator de Equiv. Carga ¹¹		Fator de Veículo	
		FEC _{AASHTO}	FEC _{USACE}	FV _{AASHTO}	FV _{USACE}
2C	546	2,72	3,57	0,55	0,72
2S1	635	5,12	6,86	1,21	1,62
2S2	230	4,36	12,12	0,37	1,04
2S3	449	4,28	12,87	0,71	2,15
3S3	641	3,53	18,13	0,84	4,31
3T4	192	5,25	25,92	0,37	1,85
Fator de Veículo (Fv) da frota analisada				3,69	9,84

VDM PS km 19	Classific.	Configuração					AASHTO	USACE	AASHTO	USACE
		EIXOS	ESRS	ESRD	ETD	ETT	FEC	FEC	PS km 19	
546	2C	2	1	1	0	0	2,72	3,57	1486	1947
635	2S1	3	1	2	0	0	5,12	6,86	3249	4355
230	2S2	4	1	1	1	0	4,36	12,12	1005	2790
449	3S3	5	1	1	0	1	4,28	12,87	1923	5780
641	3S3	6	1	0	1	1	3,53	18,13	2262	11614
192	3T4	2	1	0	3	0	5,25	25,92	1007	4970
2.693							FR: 1,0	N _{dia}	10.932	31.457
							F_D: 0,85	N_{ano}	3,39E+06	9,76E+06

Empregando-se os resultados apresentados¹², estimou-se um N_{AASHTO} igual a $3,74 \times 10^7$ para o período de 10 anos, enquanto o N_{USACE} é de $1,02 \times 10^8$.

¹⁰ VMDa: Volume Médio Diário Anual de tráfego referente os anos de 2013, 2014, 2015 e 2016.

¹¹ Adotando carregamento máximo nos eixos ou grupos de eixos (ESRS, ESRD, ETD, ETT), sem considerar nenhum limite de tolerância ou nível de sobrecarga.

¹² Dados atualizados em relação a Mattos (2014) em relação à classificação “Outros” na planilha de dados da Concessionária que havia sido desconsiderada.

4.1.2 Comparativo entre os sistemas de fiscalização de cargas - Posto de pesagem (PPVM) e Sistema de pesagem em movimento (WIM)

Com o objetivo de compararem-se os dados de tráfego levantados na praça de pedágio P1, são apresentados na sequência os volumes de tráfego e classificação da frota adquiridos através do sistema WIM instalado na rodovia.

Os volumes de tráfego da BR-290/RS – Freeway monitorados pelo Sistema WIM são apresentados na Figura 65 e Figura 66. Inicialmente na Figura 65 são apresentados os volumes totais de veículos e total de veículos comerciais monitorados mensalmente (Jan-Dez) no decorrer do ano de 2014. A variação do total de veículos monitorados nas duas faixas de implantação do sistema ficou entre 467.771 veículos (mês de fevereiro) e 225.557 veículos (mês de outubro).

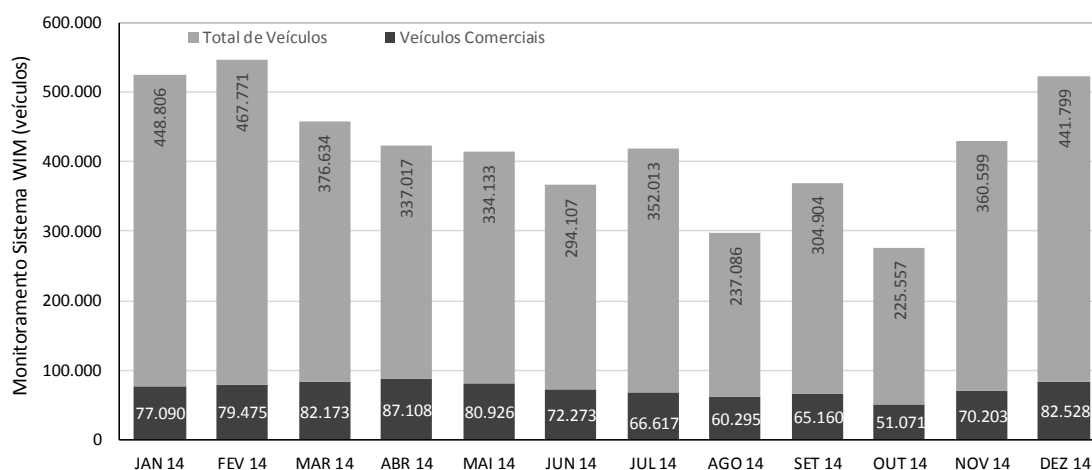


Figura 65 – Volume total de veículos e volume de veículos comerciais monitorados mensalmente no decorrer do ano de 2014 através do Sistema WIM

Na Figura 66 observa-se a variação do volume total de veículos comerciais monitorados mensalmente no decorrer de 2014 e o volume médio diário comercial resultante (VMDc).

Conforme mostrado na Figura 67, os valores de VMDc obtidos através do monitoramento WIM encontram-se próximos, na grande maioria dos casos, dos dados gerados a partir da praça de pedágio. Estes valores representam o quão próximo do total de veículos que trafegam naquele trecho da rodovia passaram pelo sistema WIM e foram contabilizados como dados válidos lidos pelo sistema.

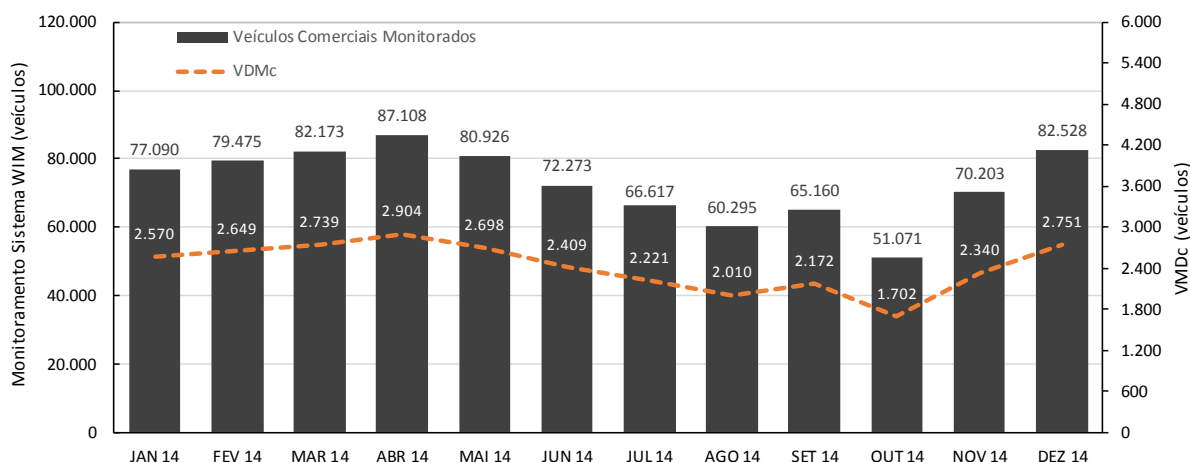


Figura 66 – Volume de veículos comerciais monitorados mensalmente no decorrer do ano de 2014 através do Sistema WIM e Volume médio diário comercial resultante (VMDc)

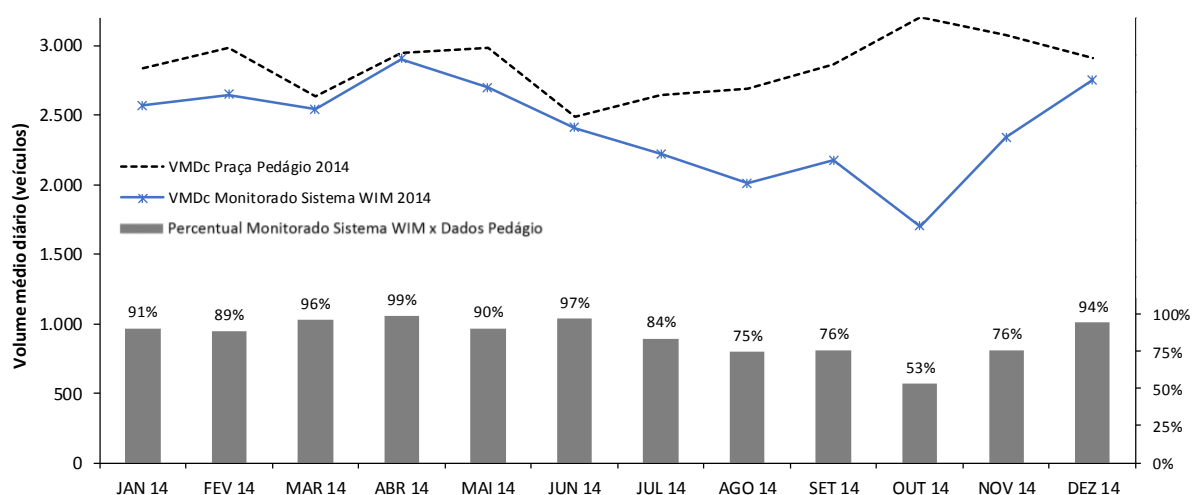


Figura 67 – Dados comparativos e percentuais de VMDc obtido através do monitoramento pelo Sistema WIM instalado na rodovia e valores obtidos da praça de pedágio (P1)

Algumas das divergências entre os totais de veículos contabilizados pela praça de pedágio e pelo sistema WIM podem ser relacionadas a problemas técnicos enfrentados no segundo semestre do ano, o que prejudicou a aquisição dos dados em sua totalidade, principalmente no mês de outubro.

Por se tratar de uma nova tecnologia, ou seja, um sistema de pesagem em movimento sobre o qual inicialmente não se tinha conhecimentos detalhados de restrições de funcionamento e principalmente de armazenamento, comunicação e transmissão de dados, enfrentaram-se algumas dificuldades quanto à aquisição contínua de um grande volume de dados.

As dificuldades e imprevistos encontrados no desenvolvimento da pesquisa, algumas já previstas em projeto, foram progressivamente contornadas através de uma forte interação com a equipe de TI da concessionária (Concepa), o que possibilitou, além de um grande aprendizado, a coleta de significativo volume de informações para compilação de um banco de dados do tráfego representativo.

Contudo, somente o conhecimento detalhado do volume de tráfego circulante na rodovia não é suficiente para determinar sua influência no desempenho do pavimento, o que foi definido como sendo um objetivo desta pesquisa.

É indiscutível a importância do monitoramento das cargas de tráfego para uma correta definição das solicitações que sofrerá o pavimento durante a sua operação. Um monitoramento mais acurado das reais cargas transportadas em nossas rodovias vem a proporcionar uma grande evolução na forma como as análises de desempenho são realizadas.

Sabe-se das inúmeras dificuldades que são encontradas através dos sistemas convencionais de fiscalização de cargas nas rodovias brasileiras. O conhecimento do espectro de cargas atuantes sobre um determinado pavimento favorece melhores tomadas de decisões no gerenciamento, atividade na qual as cargas transportadas sempre representam uma grande incógnita. Com a utilização de Sistemas WIM este conhecimento torna-se cada vez mais acessível e os resultados encontrados na presente pesquisa serão apresentados a seguir juntamente com os dados adquiridos, através dos sistemas convencionais de fiscalização.

A seguir são apresentados os monitoramentos de cargas transportadas realizados de formas distintas, através da fiscalização do Posto de Pesagem Móvel (PPVM) localizado no km65 da Pista Sul e através do Sistema de Pesagem em Movimento WIM implantado no km72 da Pista Sul.

Realizou-se durante o período de vigência da pesquisa o monitoramento da operação do PPVM. O número de pesagens realizadas mensalmente está expresso na Figura 68, a seguir. Observa-se que no primeiro trimestre de 2014 houve um funcionamento mais ativo do posto, porém o volume de veículos fiscalizados (de 6 a 9 mil) é baixo quando comparados com o VMDc da rodovia (por volta de 2.500 veículos).

Nos meses subsequentes (abril a agosto) houve um funcionamento muito reduzido do PPVM e nos demais meses do ano não houve fiscalização das cargas transportadas pela rodovia (setembro a dezembro).

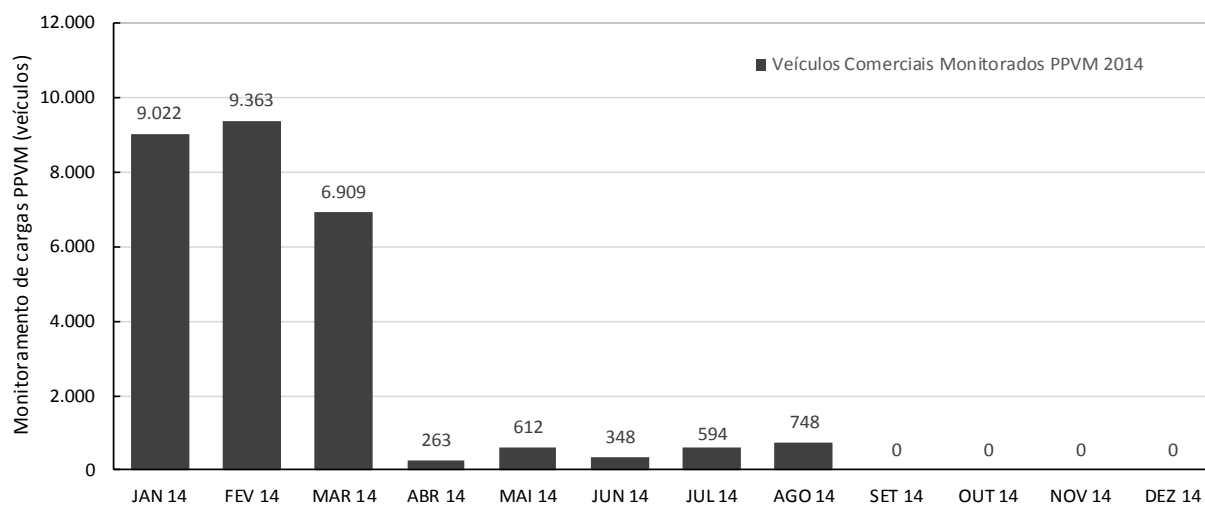


Figura 68 – Números de pesagens realizadas pelo PPVM km 65 PS da BR 290/RS – Freeway

Uma vez que os dados do PPVM não são contínuos, além de serem escassos, para realizar a avaliação do espectro de cargas através deste sistema de fiscalização procurou-se definir um período de no mínimo uma semana, com pesagens ininterruptas durante as 24 horas do dia.

Por não haver um período consecutivo de operação contínua do posto, optou-se por analisarem-se dados obtidos em dias aleatórios, nos quais a operação tivesse ocorrido durante 24 h. Mesmo após essa decisão, teve-se dificuldades em compilar dados de uma semana (7 dias), sendo possível definir apenas 5 dias aleatórios de operação ininterrupta de fiscalização; nominalmente: 07/01, 22/01, 05/02, 06/02, 11/02.

Este período de análise foi utilizado para definição da classificação da frota e cargas transportadas e são apresentados a seguir através de análises comparativas, por se tratarem de dados mais representativos da frota de veículos e das cargas que circulam pela rodovia.

Com o objetivo de verificar os resultados, tanto de características do tráfego no que diz respeito à distribuição de veículos por classe, quanto de carga transportada, é apresentado neste item um comparativo direto entre os dados obtidos pelo acompanhamento e aquisição de dados de operação do posto de pesagem (PPVM) situado no km 65 PS e do Sistema WIM instalado no km 72 PS da rodovia BR 290/RS.

Para a análise comparativa dos dois sistemas (PPVM e WIM), foi definido um período de 6 dias consecutivos de operação, no qual os dados coletados foram comparados de forma direta. Inicialmente previa-se trabalhar com dados obtidos durante uma semana, mas em função da

operação do PPVM raramente ocorrer aos domingos, reduziu-se o período de análise para seis dias, de 24/03/2014 e 29/03/2014.

Os resultados com horário de início e fim de acompanhamento (passagem do primeiro e último veículo no dia), número total de veículos detectados pelo sistema e o número de veículos comerciais (analisados) são apresentados na Tabela 24 a seguir. Os dados apresentados dizem respeito somente ao resumo das características analisadas.

Tabela 24 – Comparativo entre períodos de aquisição de dados PPVM e WIM

Dias Monitorados	24/03/2014	25/03/2014	26/03/2014	27/03/2014	28/03/2014	29/03/2014
DADOS PPVM						
Início	14:32:17	15:07:14	15:02:41	14:28:17	14:22:38	09:01:05
Fim	19:15:31	19:12:44	19:13:47	19:16:22	18:53:08	11:26:52
Horas Acompanhamento	04:43:14	04:05:30	04:11:06	04:48:05	04:30:30	02:25:47
Nº Pesagens Válidas	179	413	275	228	232	179
Total de Pesagens Realizadas	1506					
DADOS WIM						
Início	00:00:24	00:00:04	00:00:06	00:00:00	00:00:04	00:00:03
Fim	23:59:54	23:59:57	23:59:58	23:59:55	23:59:57	23:59:50
Horas Pesagem	23:59:30	23:59:53	23:59:52	23:59:55	23:59:53	23:59:47
Nº Veículos Comerciais	3.664	4.242	4.199	4.029	4.165	2.775
Total de Pesagens Realizadas	23.074					

As principais diferenças observadas dizem respeito ao período de operação diferenciado entre o PPVM e o Sistema WIM (Tabela x). Pode-se observar o reduzido tempo de operação do PPVM nas datas analisadas, limitando-se principalmente no turno da tarde. Isto difere radicalmente do regime de operação do Sistema WIM, através do qual se pode realizar um monitoramento contínuo do tráfego, o que proporciona um banco de dados bem mais consistente e sólido, com o qual é possível definir com maior grau de acurácia o real tráfego que circula na rodovia.

Após análise dos dados, foi possível definir as características do tráfego, através de seu enquadramento nas classes definidas pelo DNIT. Toda a frota foi classificada dentre mais de 20 classes para possibilitar o máximo de detalhamento dos eixos e grupos de rodas, o que será de extrema importância para análise da influência do real tráfego no desempenho do pavimento.

A distribuição média de veículos comerciais, através das classes definidas, é apresentada na Tabela 25 a seguir.

São incluídas as características da frota analisada no período, com os percentuais para cada classe de veículos, conforme dados coletados por cada um dos sistemas de fiscalização, ou seja, a distribuição média de veículos observada para os dados do PPVM (operação contínua de 6 dias) e dados do sistema WIM no mesmo período.

Levando em consideração o reduzido período de operação da balança do PPVM e sua possível influência na consistência do banco de dados, foram realizadas análises das características da frota de veículos comerciais em dias aleatórios nos quais o tempo de operação da balança foi maior (24h), tendo-se dessa forma uma gama maior de resultados e conseqüentemente uma maior confiabilidade e representatividade dos resultados obtidos.

Partindo da análise acima apresentada, observa-se no gráfico da Figura 69 que os dados coletados no PPVM e no Sistema WIM nos seis dias de coleta consecutiva apresentam uma representativa divergência quanto à distribuição percentual dos veículos de dentro das classes apresentadas. Porém, ao comparar os dados obtidos nos monitoramentos de 24h/dia do PPVM os percentuais tendem a se aproximar bastante daqueles observados por meio do sistema WIM, realizado de forma ininterrupta, correspondendo a uma condição mais realista das características do tráfego circulante na rodovia.

Conforme pode ser observado nos dados a seguir apresentados, na quantificação da frota de veículos segundo classificação realizada na Tabela 25, e posteriormente apresentada na Figura 69 e na Figura 70 é possível determinar que na frota de veículos que circulam na rodovia há uma maior ocorrência de veículos das classes:

- 2C: *Veículo comercial rígido com 2 eixos (1 ESRS + 1 ESRD);*
- 3C: *Veículo comercial rígido com 3 eixos (1 ESRS + 1 ETD);*
- 2S2: *Veículo comercial articulado com 4 eixos (1 ESRS + 1 ESRD + 1 ETD);*
- 2S3: *Veículo comercial articulado com 5 eixos (1 ESRS + 1 ESRD + 1 ETT);*
- 3S3: *Veículo comercial articulado com 6 eixos (1 ESRS + 1 ETD + 1 ETT).*

Tabela 25 – Comparativo entre distribuição percentual entre classes (PPVM e WIM)

DADOS PPVM KM 65PS x DADOS WIM KM 72PS 6 DIAS CONSECUTIVOS DE OPERAÇÃO					Total Período PPVM 6 dias 24h
Nº eixos	Classificação	Silhueta	Total Período PPVM	Total Período WIM	
			1506	23071	
2 eixos	2C		18,34%	28,27%	24,06%
3 eixos	3C		17,09%	21,90%	20,96%
	2S1		1,47%	3,52%	0,87%
	3BC		1,25%	0,00%	2,26%
4 eixos	4C		0,19%	0,17%	0,15%
	2S2		11,86%	11,22%	10,07%
	2I2		0,39%	0,65%	0,49%
	3S1		0,19%	0,13%	0,22%
	2C2		0,00%	1,03%	0,04%
	4CD		4,17%	0,00%	2,13%
	4DB*		0,04%	0,00%	0,26%
5 eixos	2S3		14,01%	9,85%	10,22%
	3S2		2,59%	1,28%	1,64%
	2I1		0,78%	0,92%	0,52%
	2C3		0,17%	0,07%	0,37%
	2I3		0,17%	0,07%	0,37%
	3I2		0,93%	0,83%	1,29%
	3C2		0,93%	0,83%	1,29%
6 eixos	3I1		0,34%	0,40%	0,54%
	3S3		15,26%	12,07%	13,02%
	3I3		3,80%	0,41%	2,73%
	2R4		0,00%	2,24%	0,03%
	3C3		0,00%	2,24%	0,03%
7 eixos ou +	7 eixos +	 	5,00%	5,04%	5,55%
* Demais Classes		-----	2,12%	0,00%	2,58%

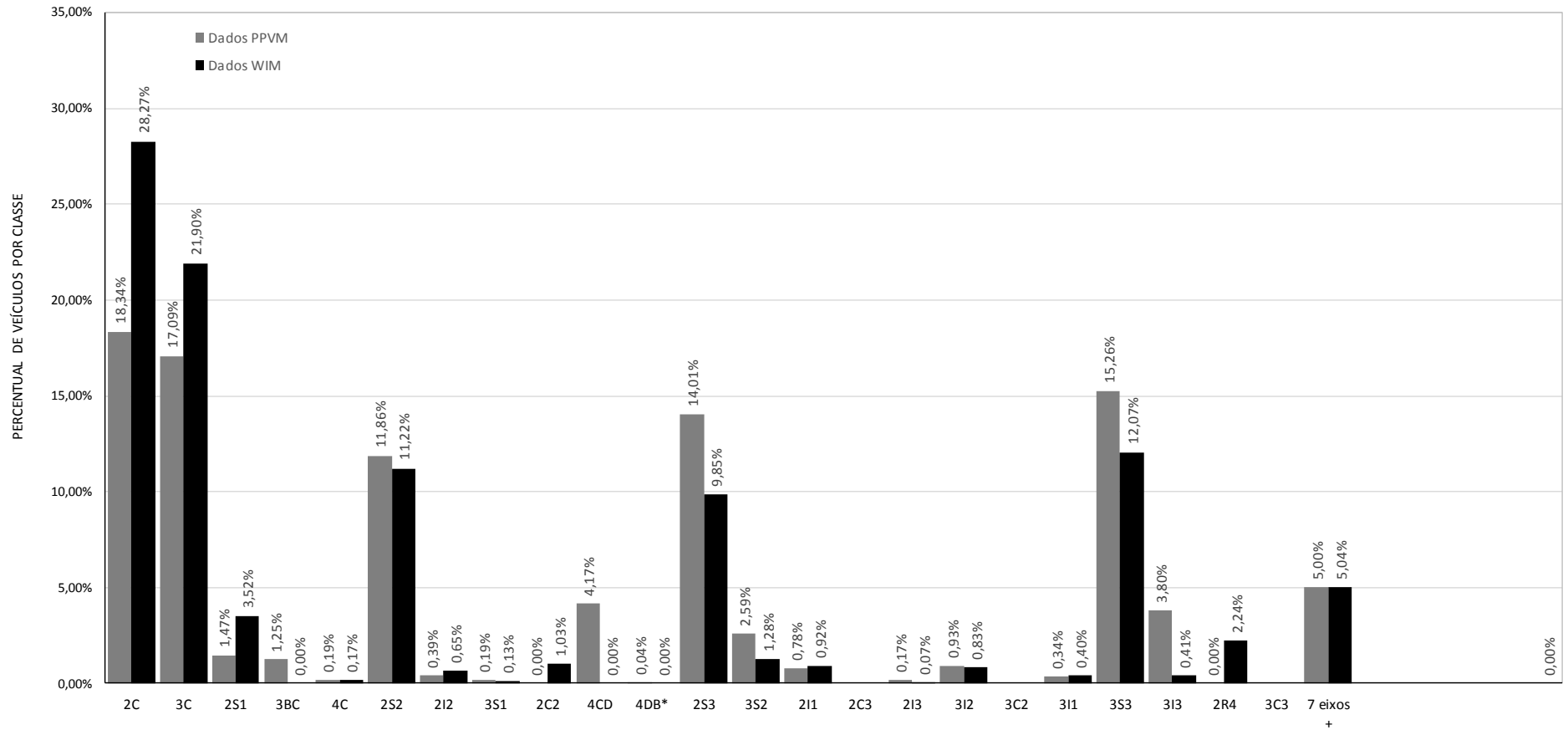


Figura 69 – Comparativo de percentuais de veículos por classe para os dois sistemas de fiscalização (PPVM e WIM)

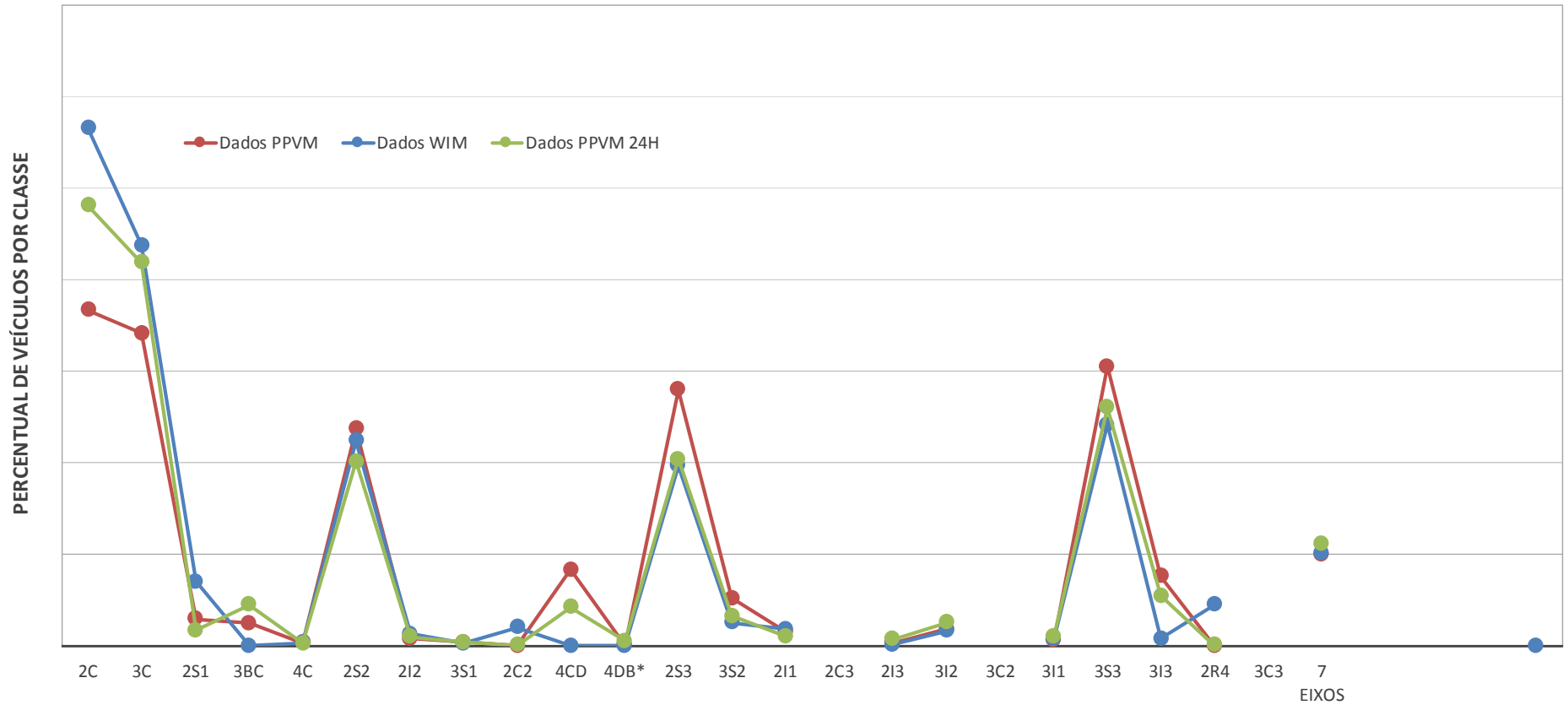


Figura 70 – Dados comparativos da frota analisada através de diferentes bancos de dados (PPVM x PPVM 24h x WIM)

A Tabela 26 e a Tabela 27, a seguir, apresentam as sínteses de pesagens realizadas nos dois sistemas de fiscalização em análise, destacando-se os excessos de carga, bem como as cargas máximas por eixo medidas ao longo do período em análise (24/03/2014 a 29/03/2014). Na balança do PPVM localizada no km65 da Pista Sul foram pesados 1.506 veículos comerciais, totalizando aproximadamente 6.202 eixos. Já através do sistema WIM, no mesmo período, foram pesados 23.071 veículos comerciais, somando aproximadamente 86.550 eixos.

Tabela 26 – Síntese do registro de excesso de cargas PPVM km65 PS – BR-290/RS Freeway

PPVM km 65 PS:		1.506 veículos comerciais: 6.202 eixos (6 dias)			
% de veículos com excesso no PBT	4,3%	Carga máxima (tf)			
% de veículos com excesso em algum eixo	17,1%	ESRS	ESRD	ETD	ETT
% ESRS c/ Excesso	8,4%	10,500	21,620	28,200	54,100
% ESRD c/ Excesso	5,6%				
% ETD c/ Excesso	11,3%				
% ETT c/ Excesso	2,4%				

Tabela 27 – Síntese do registro de excesso de cargas WIM km72 PS – BR-290/RS Freeway

Sistema WIM km72 PS:		23.071 veículos comerciais: 86.550 eixos (6 dias)			
% de veículos com excesso no PBT	6,7%	Carga máxima (tf)			
% de veículos com excesso em algum eixo	24,4%	ESRS	ESRD	ETD	ETT
% ESRS c/ Excesso	13,4%	14,500	20,100	29,900	54,900
% ESRD c/ Excesso	8,3%				
% ETD c/ Excesso	18,0%				
% ETT c/ Excesso	1,2%				

Ao analisar os dados acima apresentados é importante lembrar que os limites¹³ de cargas de eixo são os seguintes:

Carga de eixos simples (com rodado simples)	6,000 tf
Carga de eixos simples (com rodado duplo)	10,000 tf
Carga de eixo tandem duplo	17,000 tf
Carga de eixo tandem triplo	25,500 tf

¹³ Carga máxima legal sem acréscimo de “tolerância” de 10%.

Os valores de percentuais de excesso e cargas apresentadas são consistentes com os resultados de outro estudo de tráfego realizado na mesma rodovia em 2009 já apresentados na revisão, evidenciando a continuidade da ocorrência de sobrecargas na rodovia.

No que se refere aos dados de sobrecarga observados no tráfego analisado, houve um aumento dos percentuais quando se compara os resultados obtidos com o banco de dados do PPVM e aquele obtido com o Sistema WIM. Sendo o banco de informações WIM mais consistente por apresentar um maior número de dados (23.535), obtidos durante períodos contínuos de monitoramento, os valores relacionados à sobrecarga mais representativo no período de análise são os seguintes: 6,67% com excesso no PBT e 24,39% com excesso sem algum(ns) do(s) eixo(s).

Conclui-se que a fiscalização realizada através PPVM não é suficiente para caracterizar de forma coerente e precisa o espectro de cargas da rodovia, principalmente por sua oscilação de funcionamento, ficando grande parte do tempo inoperante.

Essa oscilação observada leva a uma quantificação, uma classificação e um monitoramento de cargas (e excessos de cargas) sem acurpacia. Pode-se observar no mesmo período analisado o número de veículos fiscalizados é extremamente inferior no PPVM e, conforme dados anuais obtidos, este tipo de operação é bastante comum.

De forma bastante clara, evidenciou-se a necessidade de uma fiscalização continuada das cargas transportadas pelas rodovias. Primeiramente pela variabilidade da fiscalização nos postos de pesagem (PPVM), onde no caso analisado, houve longos períodos sem nenhuma fiscalização, e em dias de fiscalização, raras vezes foram observados períodos ininterruptos de pesagem. Em um segundo momento, os percentuais e os níveis de sobrecarga são preocupantes e a sua contribuição é significativa para uma degradação prematura da estrutura dos pavimentos.

Para caracterizar com maior acurácia o espectro de cargas e as reais cargas transportadas na rodovia realizou-se uma análise continuada do banco de dados gerado pelo sistema WIM, durante o ano de 2014. Estes dados são apresentados a seguir e também serão utilizados para posterior análise de desempenho do pavimento rodoviário frente a distintos cenários de espectros de cargas formulados e já descritos anteriormente.

4.1.3 Definição do espectro de cargas na rodovia BR-290/RS através do monitoramento continuado do Sistema de pesagem em movimento (WIM)

A partir do monitoramento contínuo da frota de veículos comerciais da BR-290/RS realizado durante o período de vigência da Pesquisa WIM (2013-2015), foi possível montar um representativo banco de dados sobre a frota da rodovia.

Para análise dos dados disponíveis no sistema da Concessionária, no qual se encontram armazenados dados dos equipamentos de contagem e classificação de tráfego e do sistema WIM, foi necessário realizar um particionamento das tabelas para extração e criação de uma nova tabela somente com dados do sistema WIM (EquipmentID 8), proporcionando dessa forma uma maior agilidade nas consultas via MS SQL Server (Figura 71).

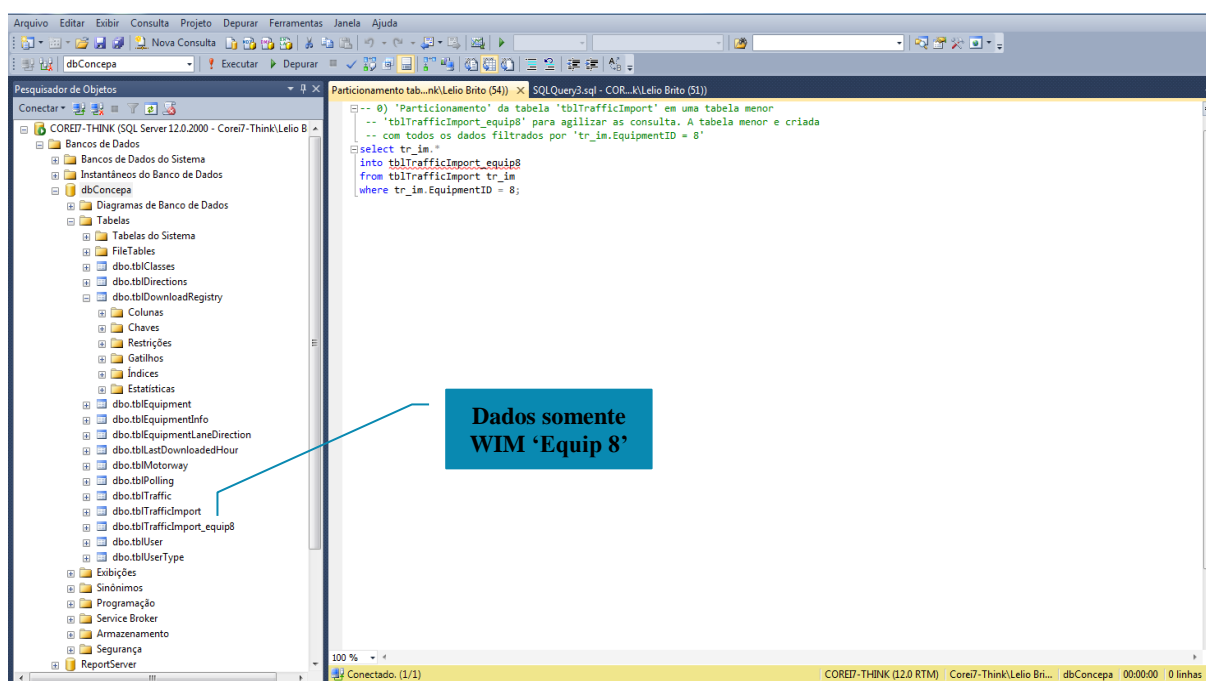


Figura 71 – Particionamento das tabelas de dados: Separação dos dados dos classificadores de tráfego e dos dados do equipamento de pesagem em movimento (WIM)

Após esta etapa iniciaram-se as análises de dados, através da verificação de consistência dos mesmos, quantificação do volume de dados disponíveis e posterior análise das cargas por grupos de eixos e por fim a definição do espectro de cargas, com a quantificação de veículos por classe e valores de PBT Médio e Máximo.

A análise do banco de dados para caracterização de carregamentos encontrados nos grupos de eixos (eixos simples de roda simples - ESRS, eixos simples de rodas duplas - ESRD, eixos em tandem duplo – ETD, eixos em tandem triplo - ETT) foi realizada após montagem de uma linguagem de consulta de dados (*Data Query Language*, DQL) no MS SQL Server. A mesma linguagem foi empregada para desenvolvimento de uma rotina de classificação dos veículos segundo classes do DNIT. Os carregamentos foram divididos em faixas de cargas para cada grupo de eixo analisado e posteriormente definidos os percentuais de eixos dentro da legislação e dos eixos sobrecarregados.

Para análise das cargas praticadas foram utilizados os dados referentes ao ano de 2014, armazenados durante os doze meses. Fez-se uma distribuição de quantidade de eixos dentro de determinados percentuais de carga preestabelecidos. O percentual de 100% corresponde a carga legal estabelecida para o referido eixo, por exemplo 6.000kg para um eixo ESRS. Valores limites mínimos e máximos de carga foram estabelecidos com o objetivo de eliminar dados espúrios, ou seja, aqueles dados que por algum motivo técnico ou falha na leitura do sistema podem não corresponder às cargas reais.

Este corte foi realizado, no limite inferior em eixos com carga abaixo de 10% do limite legal do eixo, e no limite superior em dados cuja carga ultrapassava o dobro da carga legal permitida no eixo. Os percentuais de eixos distribuídos nas faixas de cargas são apresentados a seguir na Tabela 28 e posteriormente nos gráficos da Figura 72, Figura 73. Já na Figura 74 são apresentados os percentuais médios de eixos com sobrecarga na frota analisada e valores médios de sobrecarga encontrados nos grupos de eixos.

Tabela 28 – Distribuição quantitativa de eixos dentro das faixas de cargas preestabelecidas

Faixa Cargas/ Grupo de Eixos	↓ 10% Dado espúrio	10%-50%	50%-100%	100%-110%	110%-200%	↑ 200% Dado espúrio	% eixos c/ Sobrecarga
ESRS	2,2%	28,7%	53,2%	5,6%	10,1%	0,25%	15,7%
ESRD	9,7%	41,8%	37,1%	2,7%	7,6%	1,12%	10,3%
ETD	5,5%	36,7%	37,6%	2,1%	18,0%	0,26%	20,0%
ETT	3,7%	18,8%	75,9%	0,2%	1,4%	0,02%	1,6%

Finalmente, foi possível determinar os espectro de cargas representativo do período de análise considerado (ano de 2014), com a quantificação de veículos por classe e valores de PBT Médio e Máximo, estes quantitativos são apresentados na Tabela 29 e Tabela 30.

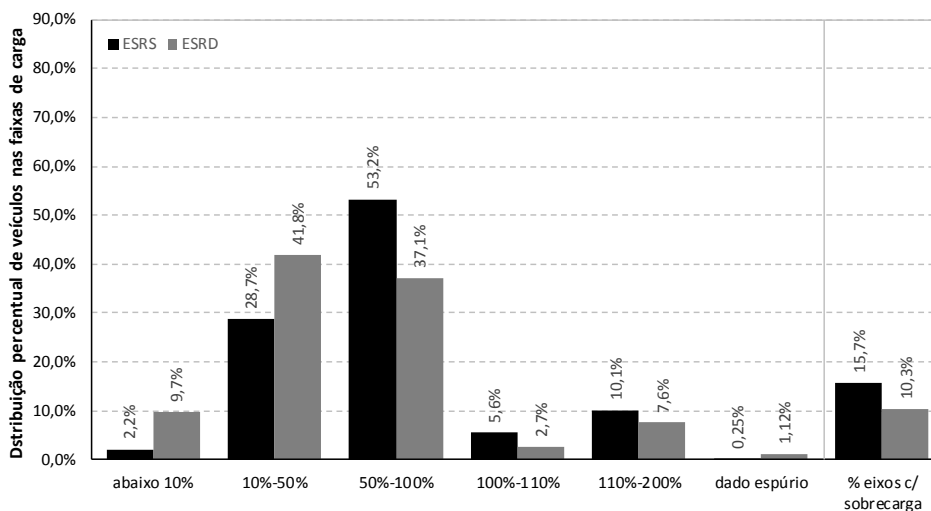


Figura 72 – Distribuição dos percentuais de eixos ESRS e ESRD nas faixas de cargas: % do limite legal permitido

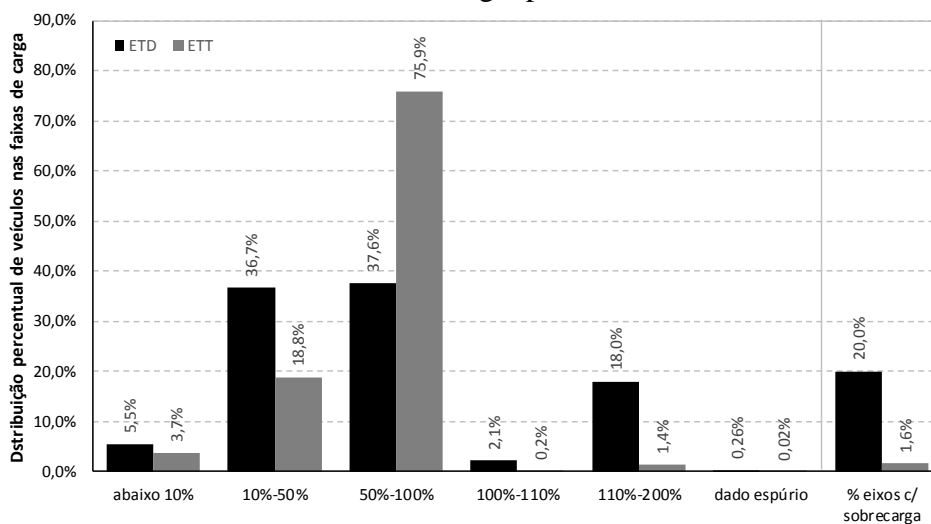


Figura 73 – Distribuição dos percentuais de eixos ETD e ETT nas faixas de cargas: % do limite legal permitido

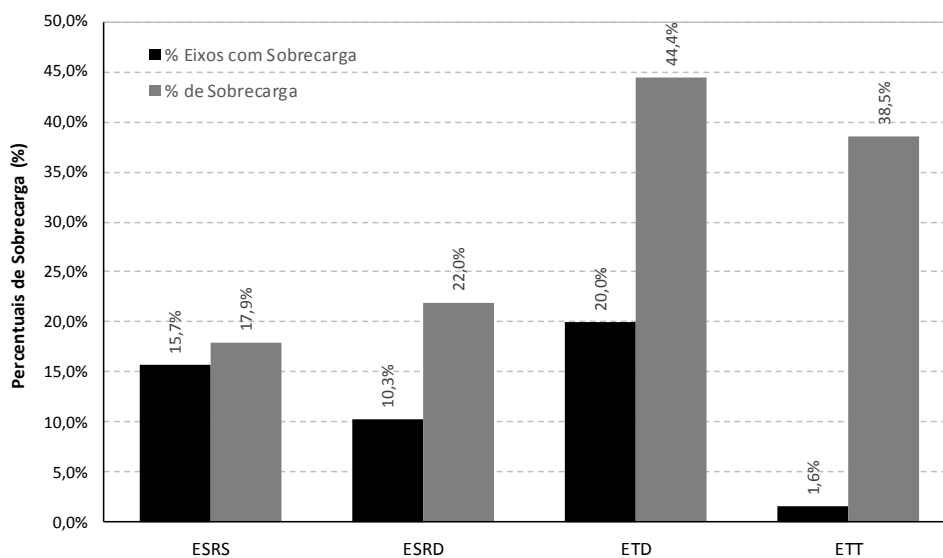


Figura 74 – Percentuais médios de eixos com sobrecarga na frota analisada e valores médios de sobrecarga encontrados nos grupos de eixos

Tabela 29 – Distribuição percentual entre classes para o período de análise de dados (2014)









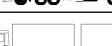







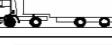

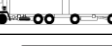

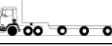

































Dados WIM: Análise da frota no ano de 2014 (874.918 veículos, 688.418 classificados - 78%)								
Nº eixos	Classificação	Silhueta	Quantidade de Veículos por Classe	ANÁLISE PESAGENS REALIZADAS NO ANO DE 2014				
				PBT	PBT+5%	% Veículos	PBT Médio	PBT Máximo
2 eixos	2C		196.168	16000	16800	28,5%	8.079	28.600
3 eixos	3C		163.089	23000	24150	23,7%	14.727	44.000
	2S1		8.355	26000	27300	1,2%	14.374	43.000
	3BC		-	23000	24150	-	-	-
4 eixos	4C		1.462	31500	33075	0,2%	19.226	47.200
	2S2		62.143	33000	34650	9,0%	16.907	55.500
	2I2		9.050	36000	37800	1,3%	18.715	58.400
	3S1		1.000	33000	34650	0,1%	17.133	42.700
	2C2		9.050	36000	37800	1,3%	18.715	58.400
	4CD		4.994	29000	30450	0,7%	22.687	52.300
	4DB*		-	29000	30450	-	-	-
5 eixos	2S3		72.696	41500	43575	10,6%	29.777	66.400
	3S2		9.682	40000	42000	1,4%	21.241	61.400
	2I1 2C3	 	1.495	43000	45150	0,2%	33.349	65.700
	2I3		350	45000	47250	0,1%	28.700	58.700
	3I2 3C2	 	13.647	43000	45150	2,0%	22.132	61.300
6 eixos	3S3		94.444	45000	47250	13,7%	37.938	81.900
	3I3		991	45000	47250	0,1%	39.720	62.850
	2R4		1.842	45000	47250	0,3%	38.564	67.456
	3C3 3I1	 	2.430	45000	47250	0,4%	42.536	79.900
7 eixos ou +	3D4		35.529	45000	47250	5,2%	58.490	92.325
	3M6			74000	77700			
	3R6			74000	77700			
	3D6, 3P5, 3SD			Variável Máx 80000	Variável Máx 80000			
Total de leituras no ano:		874.918	688.418	78% dos dados coletados foram classificados				

Tabela 30 – Distribuição percentual entre classes para o período de análise de dados (2014)

Dados WIM: Análise da frota no ano de 2014 (874.918 veículos, 688.418 classificados - 78%)											
N° eixos	Classificação	Silhueta	Quantidade de Veículos por Classe	CARGAS MÉDIAS POR EIXO / GRUPO EIXOS 2014 (kg)							
				ESRS		ESRD		ETD		ETT	
				Média	Máx*	Média	Máx*	Média	Máx*	Média	Máx*
2 eixos	2C		196.168	3.120	12.000	5.983	19.800				
3 eixos	3C		163.089	3.528	12.000			12.303	39.300		
	2S1		8.355	4.022	11.900	7.742	18.900				
	3BC		-								
4 eixos	4C		1.462	4.128						24.398	46.100
	2S2		62.143	4.181	12.000	6.826	19.100	16.800	37.300		
	2I2		9.050	4.151	11.700	6.530	17.900				
	3S1		1.000	4.557	11.500	6.311	12.000	15.640	27.500		
	2C2		9.050	4.151	11.700	7.359	17.900				
	4CD		4.994	4.142	12.000			13.466	39.700		
	4DB*		-								
5 eixos	2S3		72.696	4.374	12.000	7.821	19.800			21.830	51.500
	3S2		9.682	4.662	11.900			13.437	35.000		
	2I1 2C3	 	1.495	4.530	11.600	8.140	18.600	15.897	30.600		
	2I3		350	4.600	8.300	7.650	17.750				
	3I2 3C2	 	13.647	4.374	12.000	7.826	15.200	12.385	29.900		
6 eixos	3S3		94.444	5.006	12.000			15.840	36.800	22.856	54.900
	3I3		991	4.280	11.500	7.560	14.600	14.650	28.300		
	2R4		1.842	4.120	12.000	7.960	16.520	16.100	26.690		
	3C3 3I1	 	2.430	4.145	11.900	7.586	17.500	16.869	36.800		
7 eixos ou +	3D4 3M6 3R6 3D6, 3P5, 3SD	   	35.529	4.100	12.000	8.320	16.560	16.300	34.620	20.750	52.300
Total de leituras no ano:		874.918	688.418	78% dos dados coletados foram classificados							

Tomando como base de dados o volume de tráfego comercial observado na praça de pedágio no decorrer do ano de 2014, chega-se a um VMDc de 2.800 veículos, resultando em uma estimativa de 1.022.000 veículos comerciais no ano. Através do sistema WIM foram pesados no mesmo período de 12 meses 874.918 veículos de carga, ou seja, este valor representa 85% desta estimativa. Esta redução se deve ao fato do Sistema WIM estar instalado em apenas duas das três faixas de projeto, e também em função de alguns problemas técnicos do sistema relatados anteriormente, fato que levou a uma perda de dados durante o período de monitoramento do tráfego.

Do total de veículos pesados, foram classificados e analisados 688.418 veículos (68% do total). Ocorreu uma perda de aproximadamente 17% (186.500) deste volume de veículos por inconsistência de alguma leitura realizada (distanciamento entre eixos, carga em algum eixo, etc.) que impossibilitou a classificação e análise do dado coletado.

Este percentual representa um número considerável de dados “perdidos” se analisado de forma isolada, cerca de 510 veículos por dia, em média. Porém, vale lembrar que ocorreram algumas falhas no sistema no segundo semestre do ano, conforme comentado anteriormente, fato este que impossibilitou uma coleta continuada de dados em sua totalidade (armazenamento). Observa-se uma grande demanda no que diz respeito ao aprimoramento do sistema, tanto ao armazenamento e transmissão dos dados quanto de análise e classificação dos dados coletados em campo.

A partir das análises dos dados de pesagens realizadas pelo sistema WIM durante todo o ano de 2014 e representados nas tabelas e gráficos anteriormente apresentados pode-se chegar as seguintes conclusões sobre o tráfego da BR-290/RS- Freeway:

- a) Apesar de algumas dificuldades enfrentadas, o sistema WIM mostrou-se de grande potencial para fiscalização das cargas transportadas na rodovia, principalmente quanto a sua coleta de dados sem perturbação ao tráfego (formação de filas), além de inúmeras outras vantagens sobre os sistemas de fiscalização convencionais (monitoramento sem interrupções);
- b) Para o tráfego analisado, referente ao ano de 2014, as cargas médias dos eixos e grupos de eixos foram as seguintes: ESRS: 4.220 kgf, ESRD: 7.401 kgf, ETD: 14.974 kgf e ETT: 22.459 kgf.

- c) O excesso de carga na rodovia é uma realidade, sendo que 13% do total de veículos analisados encontram-se acima dos limites legais permitidos;
- d) Foi monitorado pelo sistema WIM no ano 2014 um total de 874.918 veículos, representando cerca de 2.558.236 eixos/grupos de eixos, sendo estes divididos da seguinte forma: ESRS (688.418), ESRD (614.085), ETD (511.830), ETT (204.131).
- e) Os maiores percentuais de eixos com sobrecarga foram os eixos simples (ESRS) com 15,7% e os eixos em tandem duplo (ETD) com 20,0% do total de eixos analisados. Os menores percentuais foram observados nos eixos de rodas duplas (ESRD) com 10,3% e eixos em tandem triplo (ETT) com apenas 1,6% de eixos com sobrecarga;
- f) Em se tratando de percentuais de excesso de carga encontrados nestes eixos sobrecarregados, os maiores valores médios foram encontrados nos eixos em tandem (ETD e ETT) com 44,4% e 38,5% de excesso, respectivamente. Já nos eixos simples (ESRS e ESRD) os percentuais foram menores, porém não desprezíveis, representando 17,9% e 22,0%, respectivamente;
- g) Os excessos de carga praticados na rodovia podem ser muito elevados, o que torna imperioso o funcionamento de balanças e uma contínua fiscalização do tráfego, de forma a coibir os excessos que encurtam de sobremaneira a vida dos pavimentos.

Resumidamente, na Figura 75 são apresentados os dados de distribuição de cargas em função dos grupos de eixos analisados, ou seja, ESRS, ESRD, ETD e ETT.

A partir dos dados gerados, tanto de percentuais de veículos circulando com excesso de cargas, quanto dos reais percentuais de sobrecargas definidos nos eixos, será analisado mais adiante um comparativo da influência das cargas transportadas, principalmente no que diz respeito aos excessos, através da montagem de distintos cenários com os espectros de carga, para posterior avaliação de sua influência nos parâmetros de desempenho da rodovia.

Será avaliada a influência das reais cargas na estimativa de número N da rodovia no decorrer do período de projeto e, além destas análises, será realizada uma modelagem de desempenho no software de análise mecânico-empírico da AASSHTO (AASHTOWare), no qual considera-se as distribuições de cargas nas classes e níveis definidos nesta pesquisa.

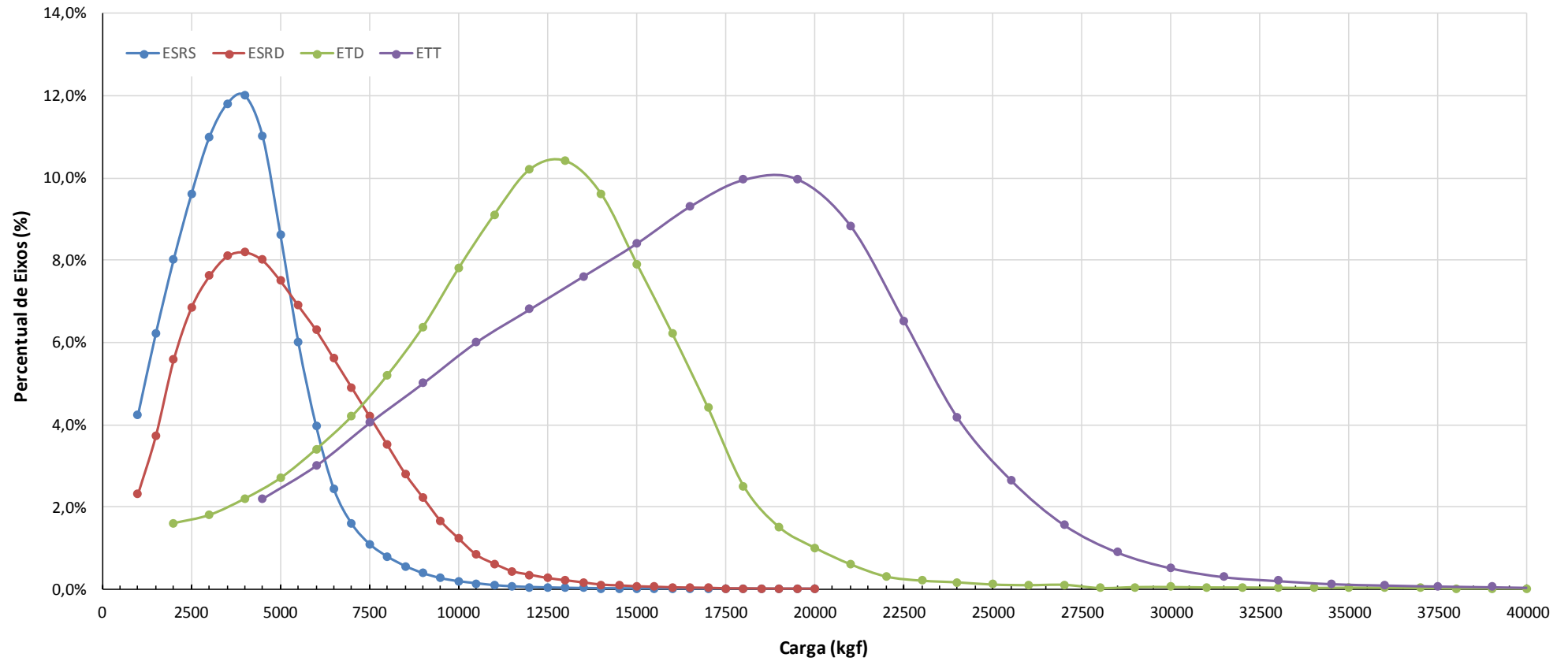


Figura 75 – Distribuição de cargas em função dos grupos de eixos (ESRS, ESRD, ETD e ETT)

4.2 Definição das solicitações de tráfego nos trechos da BR-448/RS

Conforme apresentado na metodologia de pesquisa, o estudo de tráfego dos trechos monitorados na BR-448/RS, para definir o volume e a composição da frota, foi realizado através de videomonitoramento.

Uma vez que não existem nessa rodovia praças de pedágio nem outras formas de fiscalização de tráfego, foi necessário o desenvolvimento de um plano de ação juntamente com a Concepa (Concessionária da BR-290/Freeway), para realizar o videomonitoramento da frota que circula na Pista Sul da BR-448/RS, junto ao entroncamento com a Freeway.

Inicialmente tinha-se a perspectiva de realização de um estudo semelhante ao realizado na Freeway, com a instalação de um Sistema de Pesagem em Movimento (WIM), para uma avaliação mais acurada da composição do tráfego e as cargas transportadas na BR-448/RS. Contudo, em função de limitações operacionais e de tempo, tal não foi possível.

Portanto, para as avaliações de tráfego e posteriormente de desempenho dos trechos monitorados na BR-448/RS serão utilizados dados de contagem e classificação da frota sem o conhecimento das cargas transportadas.

A avaliação do tráfego circulante foi realizada após completarem-se 12 meses de operação da rodovia. A contagem e a classificação foram realizadas em um período de três dias consecutivos (terça-feira, quarta-feira e quinta-feira) em horário compreendido entre 06:00h e 22:00h, com contabilizações de volume e composição sendo agrupadas em intervalos de 15min em 15min. Posteriormente foi realizada a expansão do tráfego para 24h.

A classificação considerada está especificada na Tabela 31 a seguir, com distinção de classe, número de eixos, PBT máximo e caracterização da frota. A partir dos dados obtidos foi determinada uma estimativa do tráfego solicitante no trecho em monitoramento e determinado o número N da rodovia.

O tráfego determinado a partir destes procedimentos apresentados será considerado como sendo representativo da realidade da rodovia durante seu período de avaliação de desempenho dos trechos monitorados.

Tabela 31 – Classes de veículos contabilizados no estudo de tráfego
(BR-448/RS Trecho 1 e Trecho 2)

CLASSE	Nº DE EIXOS	PBT MÁX (t)	CARACTERIZAÇÃO
pas	2	-	Veículo de Passeio
O2 C	2	16	Ônibus
O3 C	3	19,5	Ônibus
O4 C	4	25,5	Ônibus
2C	2	16	Caminhão simples
3C	3	23	Caminhão trucado
4C	4	31,5	Caminhão médio
2S2	4	33	Caminhão trator + semi reboque
2S3	5	41,5	Caminhão trator + semi reboque
2J3	5	43	Caminhão trator + semi reboque
3S2	5	40	Caminhão trator trucado + semi reboque
3S3	6	45	Caminhão trator trucado + semi reboque
3J3	6	45	Caminhão trator trucado + semi reboque
3I3	6	45	Caminhão trator trucado + semi reboque
3T4	7	57	Bi trem Articulado
3T6	9	74	Rtri trem ou Rodotrem
2C2	4	36	Caminhão + reboque
2C3	5	43	Caminhão + reboque
3C2	5	43	Caminhão trucado + reboque
3C3	6	45	Caminhão trucado + reboque
3D4	7	57	Romeu e Julieta (Caminhão trucado + reboque)
3D6	9	80	Caminhão trator trucado + 2 semi-reboques

4.2.1 Estimativa de Número N (dados videomonitoramento)

Realizou-se a classificação da frota de veículos no estudo de tráfego conforme as 21 classes apresentadas para que se pudesse ter um bom detalhamento das configurações de eixos da frota circulante e assim determinar os Volumes Médios Diários e posteriormente calcular o número N da Rodovia.

Na falta de dados de carregamentos, procedeu-se conforme acontece na imensa maioria dos casos de dimensionamento e análise do tráfego solicitante, ou seja, considerou-se que todos os veículos de carga trafegam com a carga máxima permitida por eixo segundo legislação vigente (sem o limite de “tolerância” de 10%).

Seguindo a mesma metodologia apresentada anteriormente para a definição do número N dos trechos da BR-290/RS, calcularam-se os fatores de equivalência de cargas para cada uma das classes e definiu-se o N_{anual} da Rodovia BR-448/RS conforme apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 – Estimativa do número N da Rodovia BR-448/RS através da determinação dos fatores de carga (FC) para as classes observadas no estudo de tráfego

VMDa	Classific.	Configuração					AASHTO	USACE	AASHTO	USACE	
		EIXOS	ESRS	ESRD	ETD	ETT	FEC	FEC	P S km 15		
16.151	pas	2					0,00	0,00	0	0	
203	O2C	2	1	1			2,72	3,57	553	724	
42	O3C	3	1		1		1,97	8,83	83	371	
3	O4C	4	2		1		2,30	9,10	7	27	
913	2C	2	1	1			2,72	3,57	2485	3257	
406	3C	3	1		1		1,97	8,83	800	3584	
125	4C	4	1			1	1,89	9,58	236	1197	
9	2S2	4	1	1	1		4,36	12,12	39	109	
172	2S3	5	1	1		1	4,28	12,87	736	2213	
3	2J3	5	1	2	1		6,76	15,41	20	46	
32	3S2	5	1		2		3,61	17,38	116	556	
444	3S3	6	1		1	1	3,53	18,13	1567	8048	
0	3J3	6	1	1	2		6,01	20,66	0	0	
23	3I3	6	1	3	1		9,15	18,70	211	430	
74	3T4	7	1		3		5,25	25,92	389	1918	
24	3T6	7	1		4		6,90	34,47	166	827	
2	2C2	4	1	3			7,51	10,15	15	20	
0	2C3	5	1	2	1		6,76	15,41	0	0	
3	3C2	5	1	2	1		6,76	15,41	20	46	
3	3C3	6	1	1	2		6,01	20,66	18	62	
3	3D4	7	1		3		5,25	25,92	16	78	
3	3D6	9	1		4		6,90	34,47	21	103	
2.487							FR: 1,0		N_{dia}	7.496	23.618
							F_D: 0,85		N_{ano}	2,33E+06	7,33E+06

Empregando-se os resultados apresentados, estimou-se para um período de projeto de 10 anos um N_{AASHTO} igual a $2,83 \times 10^7$ e um N_{USACE} é de $8,92 \times 10^7$.

4.3 Considerações finais sobre análise de tráfego

Finalizado o presente capítulo vale ressaltar a importância da definição das características do tráfego solicitante, não somente a classificação em função das composições, mas de forma muito mais relevante uma definição das cargas transportadas. Conforme observado em levantamentos bibliográficos no decorrer do presente trabalho, pesquisas práticas e observações de campo, uma das grandes dificuldades no dimensionamento de um pavimento rodoviário é a obtenção de dados reais e representativos sobre o tráfego que irá solicitar a estrutura do pavimento durante a sua vida útil, principalmente dados de carregamento da frota solicitante.

Segundo pesquisas realizadas sobre as condições de fiscalização de cargas das rodovias nacionais, percebe-se que existem poucos postos em operação e sua operação ocorre de forma intermitente, na grande maioria dos casos operando somente em horário comercial o que dificulta um monitoramento eficiente.

Esta dificuldade, em manter-se um monitoramento de cargas de forma ininterrupta, leva a uma condição deficitária da fiscalização e também em âmbito de desenvolvimento de estudos e pesquisas com a finalidade meramente acadêmica para obtenção de um banco de dados nacionais ou mesmo regionais sobre as cargas transportadas pelas nossas rodovias para o conhecimento dos índices de sobrecargas praticados.

Percebe-se uma preocupação quanto a esta deficiência na fiscalização e em relação os efeitos das sobrecargas na degradação prematura dos pavimentos. Na tentativa de reverter a situação encontra-se em desenvolvimento pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT um importante plano para reabilitação e reestruturação das fiscalizações de cargas em nossas rodovias. O Plano Nacional de pesagem prevê e implantação de novos e modernos postos de pesagem nos principais corredores rodoviários do país através de um novo conceito de fiscalização de cargas, os PIAFs (Postos Integrados Automatizados de Fiscalização).

Destaca-se a importância da implementação urgente do Plano Nacional de Pesagens para dar mais eficiência às rodovias, através de um escoamento mais rápido da produção, e aliviar o gasto nas estradas federais, com maiores recursos para obras de manutenção e expansão da malha, visto que o país apresenta apenas 12% de suas estradas pavimentadas e este percentual encontra-se consideravelmente degradado.

Neste contexto, os estudos realizados na presente tese foram de grande importância para o entendimento da situação e as dificuldades enfrentadas quanto à fiscalização de cargas e uma experiência extremamente importante na participação da implantação inédita no estado e no país de um sistema de pesagem dinâmico de alta velocidade (Pesquisa *Weigh-in-Motion*) de forma totalmente funcional para avaliar as cargas do tráfego da BR-290/RS – Freeway de forma ininterrupta na velocidade de operação da rodovia.

A formação de um banco de dados consistente sobre as reais cargas praticadas na rodovia foi de grande importância para as análises posteriores de desempenho do pavimento da rodovia considerando distintos cenários de carregamento (evolução dos parâmetros funcionais e estruturais em função das condições do tráfego).

Sabendo-se as magnitudes reais do tráfego que solicita um pavimento pode-se estabelecer uma relação entre a influência do tráfego com excesso de cargas, problema este de grande relevância na degradação prematura dos pavimentos rodoviários, e o surgimento dos mecanismos de degradação e sua futura evolução.

Para ambas as rodovias, a evolução do número N no decorrer da vida útil da rodovia será aplicada, posteriormente, nas análises de desempenho do pavimento, nas quais serão avaliadas as evoluções dos parâmetros funcionais e estruturais em função das solicitações de tráfego.

No Capítulo 5 a seguir, intitulado como “ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS MONITORADOS”, serão apresentados os resultados dos monitoramentos dos trechos das Rodovias BR-290/RS e BR-448/RS no que diz respeito à parâmetros funcionais da via e estruturais do pavimento.

5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS MONITORADOS

A análise dos dados obtidos na presente tese, conforme mencionado no capítulo anterior, será dividida em dois distintos momentos, no capítulo anterior foram apresentadas as análises realizadas em função do tráfego solicitante dos trechos monitorados.

No presente capítulo são apresentadas as análises de desempenho funcional e estrutural dos trechos monitorados na BR-290/RS – Freeway e na BR-448/RS e posteriormente, um comparativo entre as curvas de desempenho observadas em campo e àquelas obtidas a partir das análises realizadas considerando os distintos cenários de carregamentos dos veículos de carga (cenário com cargas ideais e cenários considerando excessos de cargas).

Através de um conhecimento detalhado de fatores relacionados à qualidade dos materiais, processos construtivos e características da estrutura do pavimento, fatores estes definidos através do Programa Rede Temática de Asfaltos, é possível analisar de forma mais detalhada os mecanismos de degradação predominantes, ocorrentes durante a vida de serviço do pavimento, com atenção especial para a influência da magnitude do carregamento (sobrecargas) e a ação climática sobre a estrutura analisada.

5.1 Análise de Desempenho dos Trechos Monitorados na BR-290/RS -Freeway

Serão apresentados a seguir as principais atividades desenvolvidas para avaliação de desempenho dos trechos monitorados. Esta avaliação consistiu no acompanhamento sistemático da evolução de parâmetros de desempenho funcional e estrutural dos trechos implantados, tais como, acompanhamento de irregularidade longitudinal (IRI), macrotextura superficial (Mancha de Areia - Hs), microtextura superficial (Pêndulo Britânico - BPN), afundamentos nas trilhas de roda (ATR), levantamento de defeitos (LVC) e avaliação de deflexões do pavimento com emprego de *Viga Benkelmann*.

A avaliação dos parâmetros acima descritos será realizada em função do tempo de serviço do pavimento, ou seja, em função do nível de solicitação de tráfego que o trecho monitorado vem sofrendo desde sua abertura ao tráfego.

5.1.1 Avaliação da Irregularidade Longitudinal (IRI) com Perfilômetro Laser

A evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) nos dois trechos da BR-290/RS durante o período de monitoramento é apresentada na Figura 76. Fortemente dependente do processo construtivo, a irregularidade inicial dos dois trechos monitorados foi bastante diferente, sendo que o Trecho I apresentou um IRI inicial bastante elevado (3,8m/km). Já no Trecho II o valor inicial foi bem mais baixo (1,8m/km). Salienta-se, que o Programa de Exploração da Rodovia (PER) estabelece como limite admissível para a irregularidade o valor de 2,7m/km.

De forma geral, observa-se que a evolução do IRI nos dois trechos se deu de forma muito semelhante, caracterizado por um leve aumento com o passar do período de acompanhamento. No Trecho 1, após a intervenção com execução de uma camada de microrrevestimento asfáltico a frio, observou-se um leve decréscimo no valor de irregularidade (de 4,0 para 3,6m/km). Já no Trecho 2, no qual não foi realizada nenhuma intervenção durante o período de monitoramento, a evolução dos valores tem seguindo os mesmos padrões com um leve incremento com o passar do tempo e solicitação do tráfego, atingindo em dezembro de 2015 o valor de 2,15 m/km.

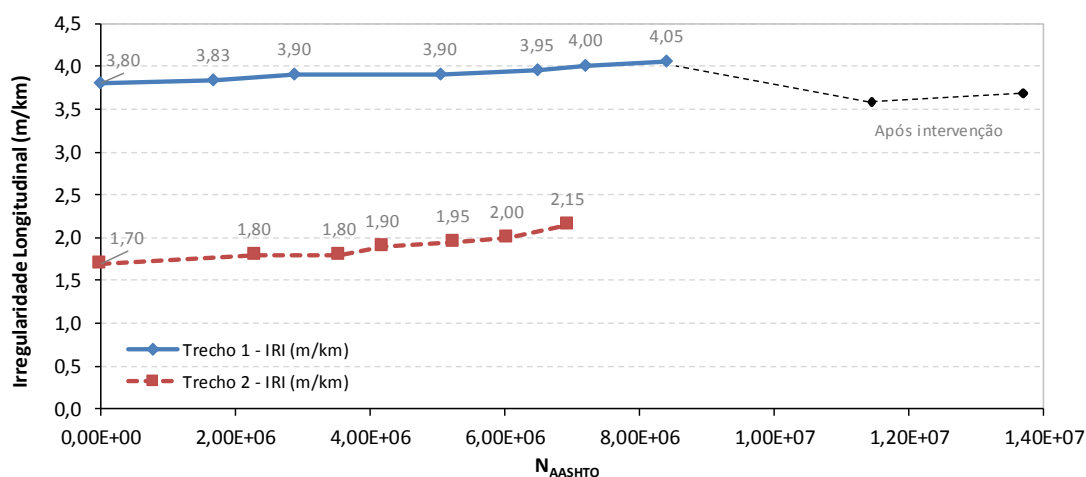


Figura 76 – Evolução da irregularidade longitudinal dos trechos monitorados 1 e 2

A seguir é apresentado um comparativo da evolução da irregularidade longitudinal utilizando os modelos de previsão de desempenho propostos por Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996), Yshiba (2003) e Vitorello (2008), sendo este último resultante de medidas realizadas na própria rodovia, a BR-290/RS – Freeway.

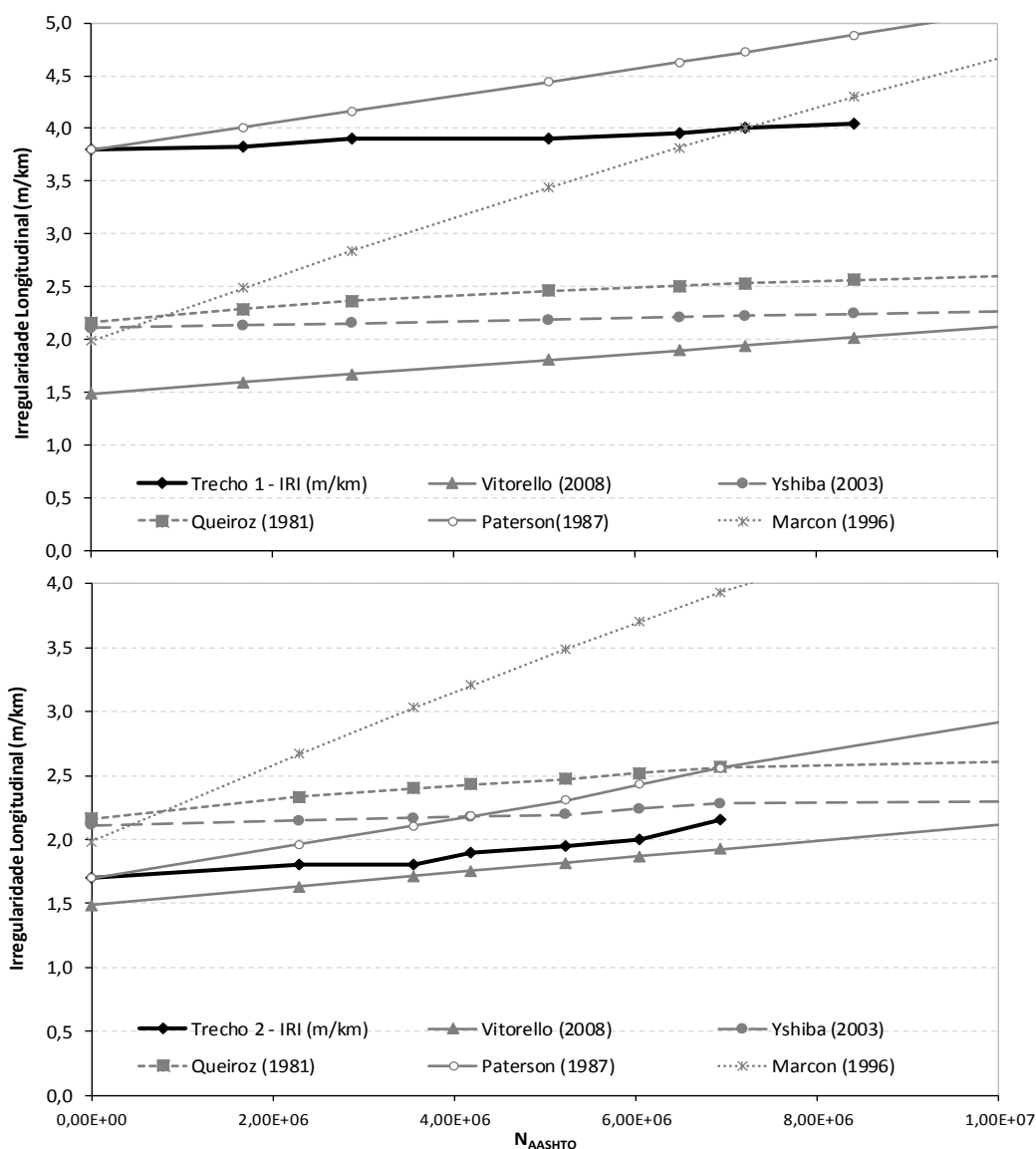


Figura 77 – Comparativo da evolução de irregularidade longitudinal nos trechos monitorados com distintos modelos de previsão de desempenho propostos

Conforme observado por Mattos (2014), a evolução da irregularidade é fortemente dependente do valor inicial, porém, a maioria dos modelos não considera esse fator. O valor inicial de IRI só é levado em consideração pelo modelo de Paterson e pelos modelos da AASHTO empregados no AASHTOWare (apresentados mais adiante).

Dentre os modelos analisados, os que mais se aproximaram dos valores observados em campo foram os modelos de Vitorello (considerando o Trecho 2, execução dentro de limites aceitáveis) e Paterson (para ambos os trechos), porém, neste último caso são observadas taxas muito severas de crescimento da irregularidade. A mesma severidade também é observada para as previsões a partir do modelo de Marcon (1996), não correspondendo ao observado em campo.

No caso do Trecho 1, o elevado valor inicial de IRI após a execução do trecho levou a um distanciamento dos modelos, quase que em sua totalidade, com a exceção daquele proposto por Paterson que considera o valor inicial.

Para os dados observados em campo, o modelo de evolução do IRI durante o período de monitoramento pôde ser definido através de um ajuste linear em função do tráfego, conforme é apresentado na Figura 78 a seguir. Observa-se que no Trecho 2, que apresentou menor irregularidade inicial, a taxa de evolução da irregularidade é praticamente o dobro da registrada no Trecho 1. Para esta variação não conseguiu-se determinar uma causa específica, poderia estar ela associada à solução diferenciada do subleito em relação ao Trecho 1, porém neste caso em específico adotou-se como solução de projeto a recomposição com rochas, que a princípio não apresentaria uma maior deformabilidade em relação à solução anterior.

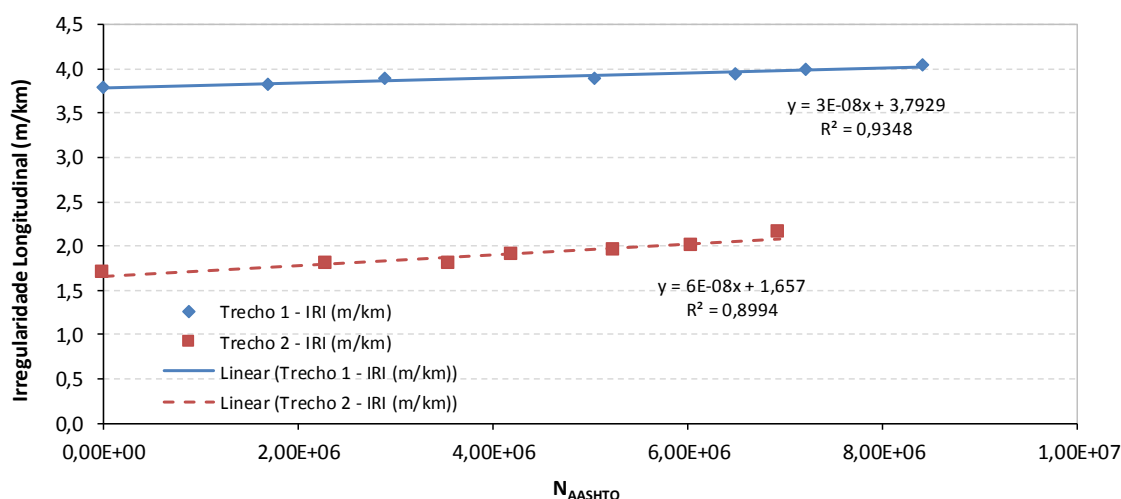


Figura 78 – Ajuste linear para evolução da irregularidade longitudinal

5.1.2 Determinação da Macrotextura Superficial – Mancha de Areia (Hs)

A macrotextura superficial, avaliada através do ensaio de mancha de areia, com a determinação da altura média de areia (Hs), apresentou evoluções semelhantes para ambos os trechos, o que era de se esperar visto que a composição granulométrica e os agregados utilizados na composição do CA são os mesmos (mesma origem e local de extração).

Na Figura 79 são apresentadas as evoluções dos valores médios de altura de areia (HSm) em ambos os trechos monitorados na BR-290/RS, ao longo do período de monitoramento. Os resultados apresentados correspondem à macrotextura medida na trilha de roda direita (TRD).

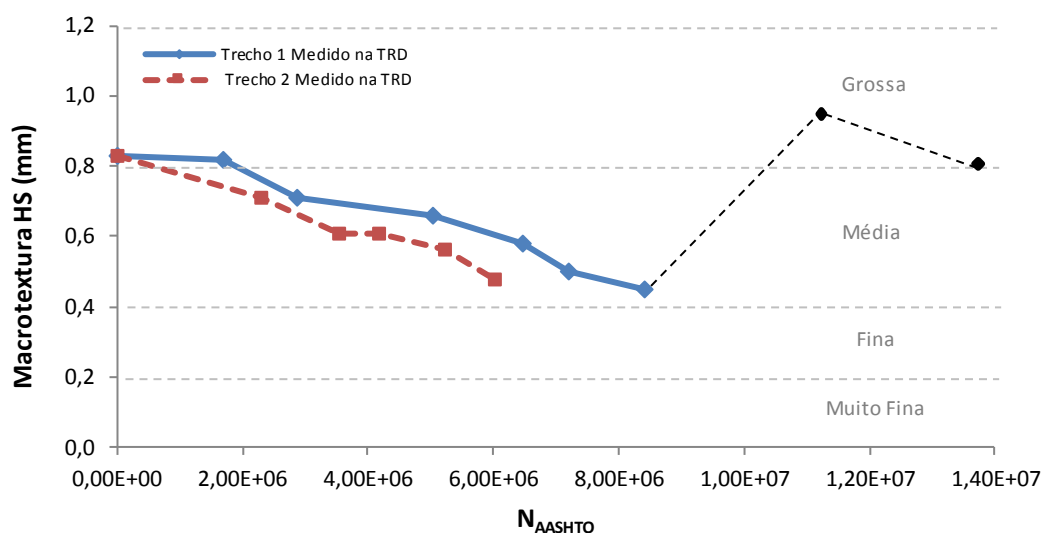


Figura 79 – Evolução da macrotextura superficial dos trechos monitorados 1 e 2

Inicialmente caracterizada como uma superfície de rugosidade GROSSA, esta propriedade, com o passar do tempo de monitoramento, apresentou uma taxa de decréscimo bastante semelhante em ambos os trechos.

Ressalta-se uma queda inicial mais brusca no Trecho 2, condição na qual a rugosidade superficial passou para uma condição MÉDIA mais rapidamente do que foi observado no Trecho 1 (somente após um tráfego de $1,68 \times 10^6$). Porém para um volume de tráfego de $2,29 \times 10^6$ a rugosidade dos dois trechos assumiu valores quase idênticos.

Após o monitoramento realizado em dezembro de 2014, as variações no Trecho 1 foram bastante semelhantes aos demais períodos acompanhados, sendo a condição superficial classificada como de macrotextura MÉDIA.

Porém, conforme mencionado anteriormente, foi realizada pela Concessionária uma atividade de manutenção no Trecho 1 através de uma aplicação de camada de microrrevestimento asfáltico. A condição anterior da superfície do trecho conduzia-se para valores limítrofes de macrotextura FINA, e após a aplicação da camada de Microrrevestimento a condição passou para uma macrotextura GROSSA.

Acompanhou-se, ainda, a evolução da macrotextura no referido trecho, após a aplicação da camada para recuperação funcional, com leituras de Hs nos anos de 2015 e 2016. Contudo, perdeu-se a linha de tendência de evolução da macrotextura foi interrompida.

Na Figura 5 se apresenta um comparativo entre o desempenho observado e o previsto seguindo o modelo proposto por Mattos (2009), desenvolvido para a mesma rodovia, com agregados e composição granulométrica do revestimento asfáltico idênticos.

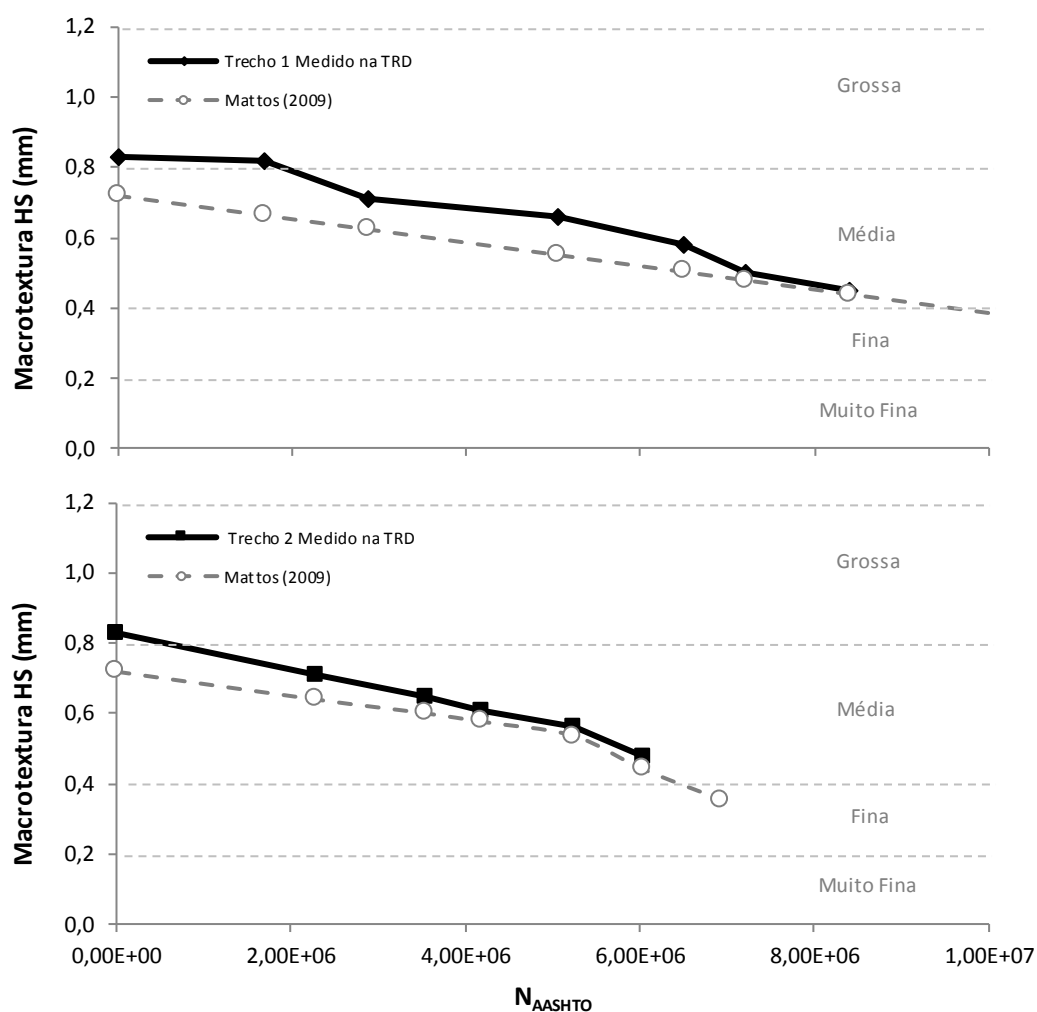


Figura 80 – Comparativo entre a evolução da macrotextura dos trechos monitorados e a estimada com aplicação de modelos de previsão proposto por Mattos (2009)

Pode-se observar uma grande semelhança dos dados coletado através do monitoramento de ambos os trechos com os valores previstos pelo modelo proposto por Mattos, principalmente no que diz respeito às taxas de decréscimo de macrotextura.

Para os dados coletados realizou-se um ajuste exponencial, mostrado na Figura 81, com variação semelhante em função do nível de solicitação de tráfego.

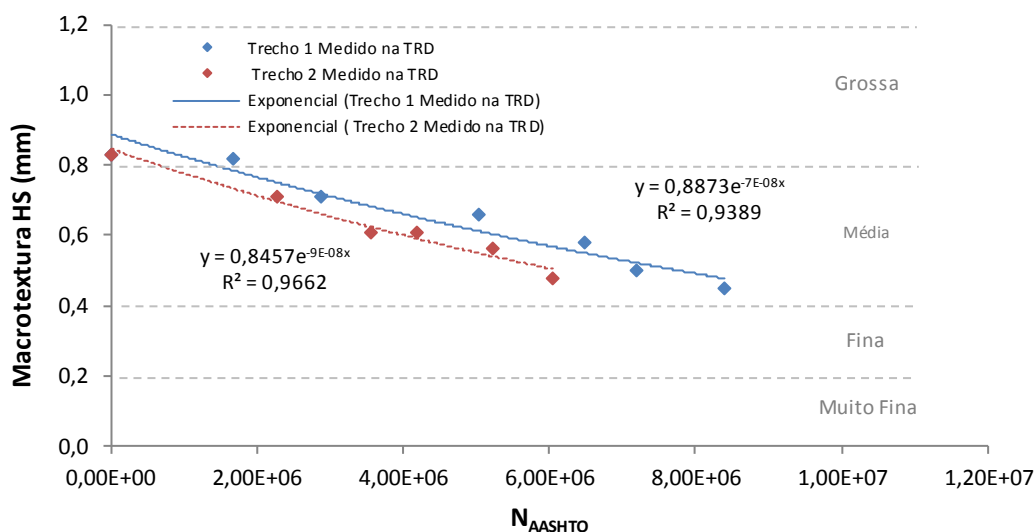


Figura 81 – Ajuste exponencial para evolução da macrotextura superficial

5.1.3 Determinação Microtextura Superficial com o Pêndulo Britânico (BPN)

Na avaliação da microtextura superficial do revestimento, avaliada através de ensaio com Pêndulo Britânico, como mostrado na Figura 82, foram observados valores iniciais muito semelhantes, com ambos os trechos classificados como apresentando superfície RUGOSA.

No Trecho 1 o valor da microtextura se manteve praticamente inalterado até um tráfego de $5,05 \times 10^6$. Já no Trecho 2, a partir de um volume de tráfego de $3,55 \times 10^6$ observou-se uma maior taxa de decréscimo de microtextura.

Comparando os valores observados com os estimados através do modelo proposto por Mattos (2009), conclui-se que as previsões feitas pelo modelo são mais pessimistas do que às observadas nos trechos monitorados. Esta variação pode ser observada na Figura 83 a seguir, onde os dados gerados pelo modelo são significativamente inferiores aos obtidos em campo.

Esperava-se que as estimativas de evoluções fossem semelhantes visto que o concreto asfáltico do trecho monitorado e daquele para o qual o modelo foi desenvolvido apresentam a mesma composição granulométrica e com agregados extraídos da mesma pedreira. Porém, esta divergência talvez possa ser atribuída à exploração de uma frente diferente de extração de rochas, na mesma pedreira do km 30 da Freeway em Santo Antônio da Patrulha - RS.

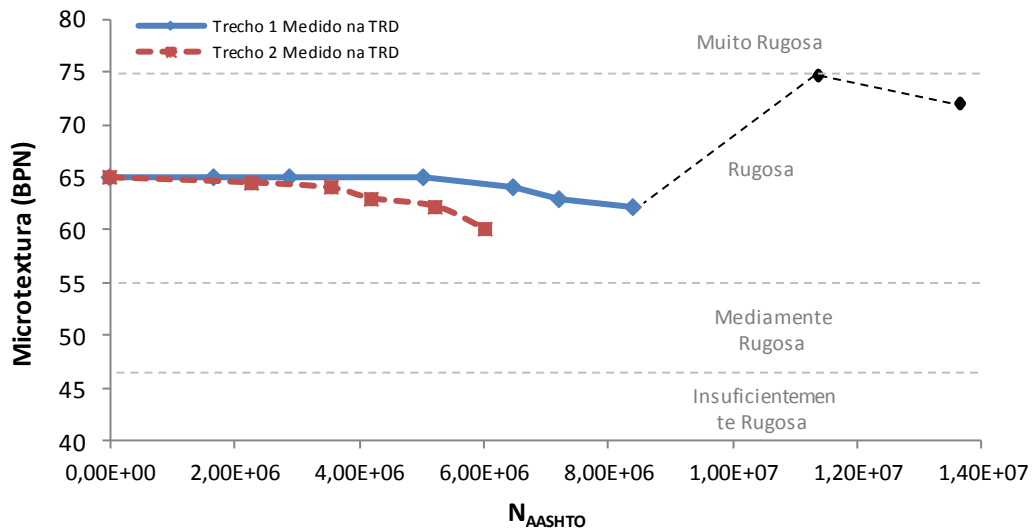


Figura 82 – Evolução da microtextura nos trechos monitorados 1 e 2

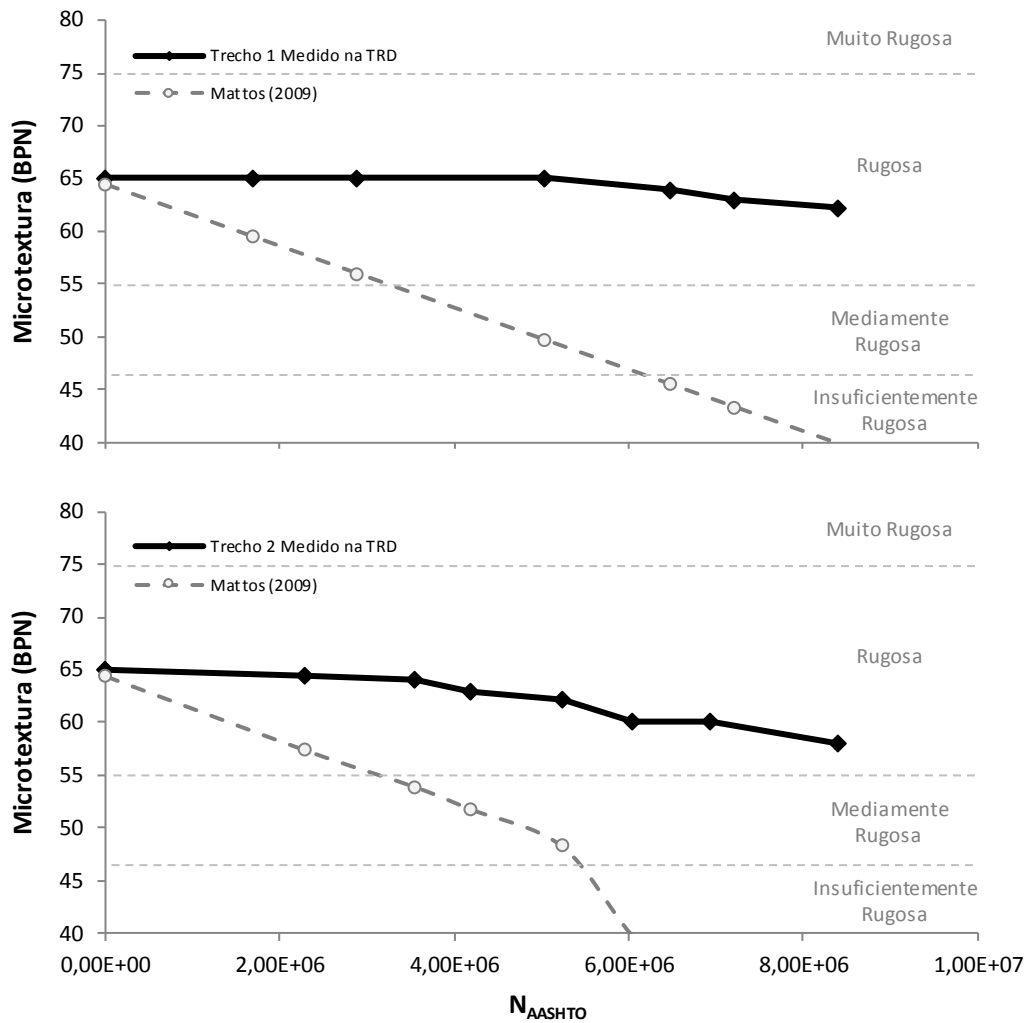


Figura 83 – Comparação entre a evolução da macrotextura nos trechos monitorados com a prevista pelo modelo proposto por Mattos (2009)

Para os dados coletados realizou-se um ajuste exponencial, conforme observado na Figura 84, observando-se que no Trecho 2 a redução da microtextura se dá a uma taxa bem superior à observada no Trecho 1.

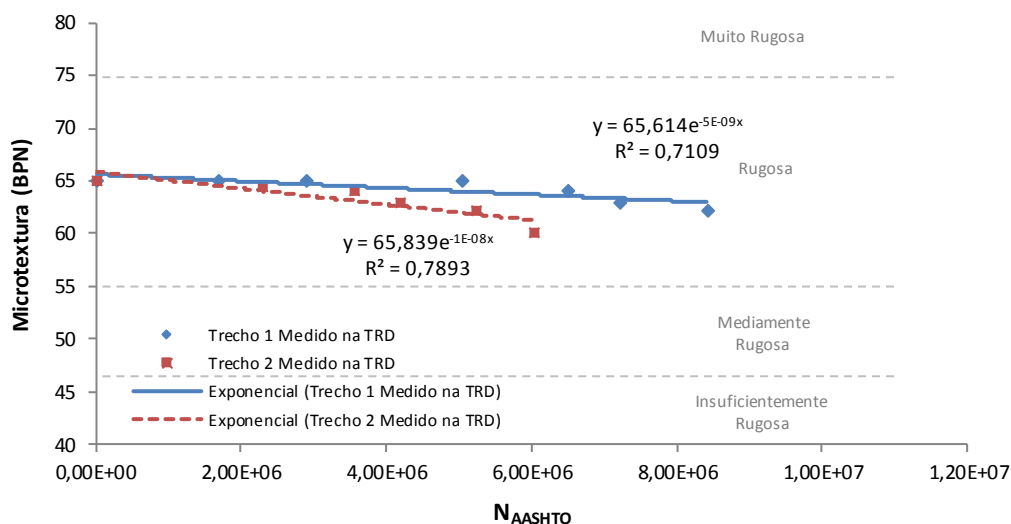


Figura 84 – Ajuste exponencial para evolução da microtextura superficial

5.1.4 Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR)

Os afundamentos nas trilhas de roda foram avaliados através de medidas com treliça metálica. Na sequência são apresentadas as evoluções dos afundamentos em função do tráfego solicitante acumulado durante o período de monitoramento. A evolução dos afundamentos nas trilhas de roda durante o período de monitoramento do Trecho 1 pode ser observado na Figura 85. Já os valores do Trecho 2 são apresentados na sequência (Figura 86) e, por fim, um comparativo para os dois trechos em sua situação crítica na qual são considerados os afundamentos máximos encontrados (ATR na trilha externa), representados na Figura 87.

Valores distintos de ATR foram encontrados para as trilhas interna e externa em ambos os trechos monitorados. Percebeu-se que as deformações permanentes são consideravelmente mais elevadas na trilha da direita (trilha externa) da faixa de rolamento em relação à trilha da esquerda (trilha externa).

A queda observada no Trecho 1 deve-se à atividade de manutenção da rodovia através da realização de uma camada de microrrevestimento asfáltico.

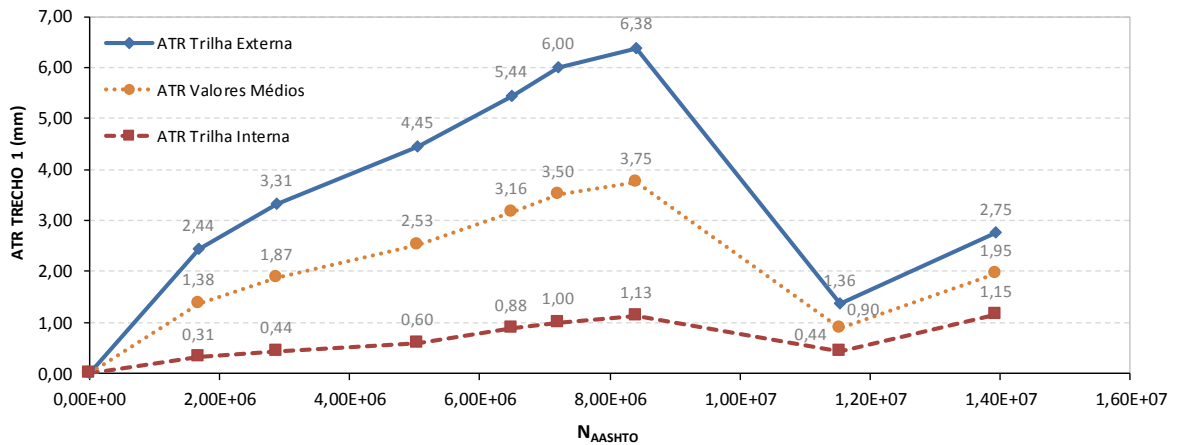


Figura 85 – Resultados de evolução de ATR na trilha interna, trilha externa e valores médios no decorrer do período de monitoramento do Trecho 1

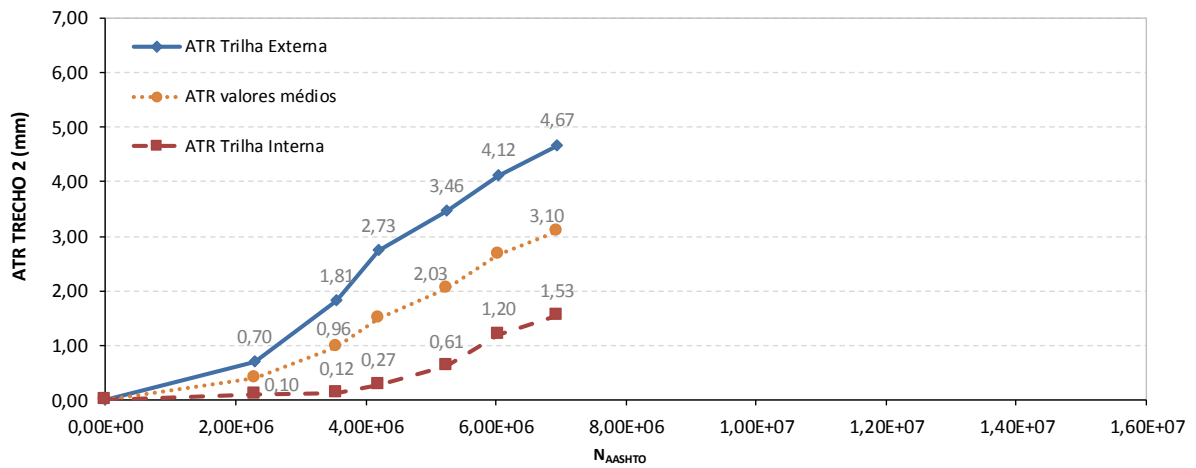


Figura 86 – Resultados de evolução de ATR na trilha interna, trilha externa e valores médios no decorrer do período de monitoramento do Trecho 2

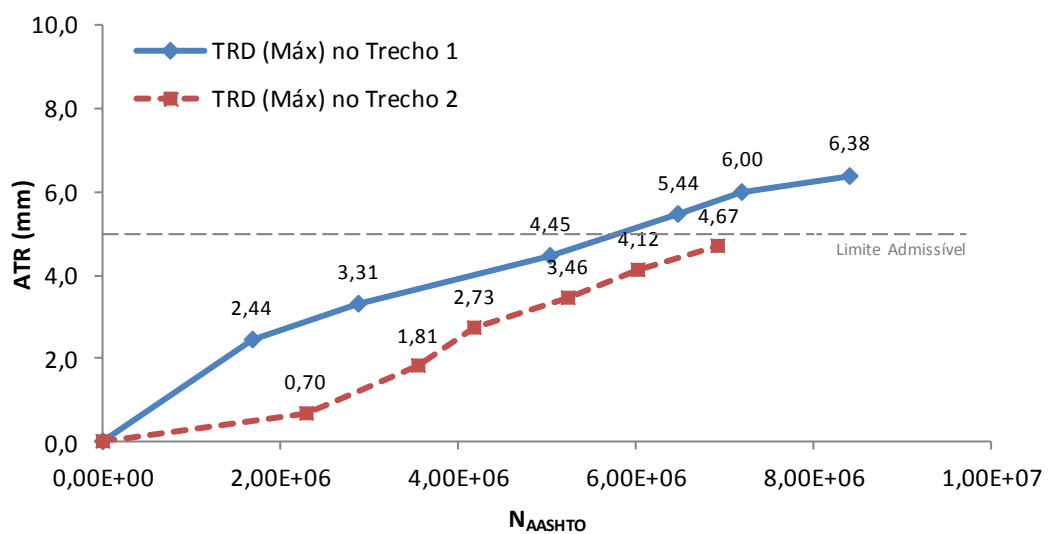


Figura 87 – Resultados de evolução de ATR, valores máximos (trilha externa)

No Trecho 1, os afundamentos na trilha de roda externa foram de 3 a 8 vezes maiores do que os observados na trilha de roda interna; já no trecho 2, os ATRs na trilha externa chegaram a ser de até 15 vezes maiores.

Uma das hipóteses mais prováveis para explicar esta ocorrência reside no menor confinamento no bordo externo, que possivelmente pode propiciar deformações maiores na trilha de roda da direita.

Considerando o limite admissível de deformação permanente de 5 mm, definido no PER, conclui-se que com um volume de tráfego de aproximadamente $6,07 \times 10^6$ (correspondente ao segundo ano de abertura ao tráfego) o pavimento do Trecho 1 já precisaria sofrer algum tipo de intervenção. Destaca-se, ainda, que no último levantamento realizado antes da intervenção com uma camada de microrrevestimento (após 35 meses de abertura ao tráfego), o pavimento apresentava ATR máximo de aproximadamente 6,4 mm.

Já no Trecho 2, após 48 meses de monitoramento e tráfego acumulado de $6,94 \times 10^6$, o limite de 5mm de ATR ainda não havia sido atingido, sendo o último valor médio observado igual a cerca de 4,7 mm.

Também se destaca a diferença considerável entre as evoluções iniciais (até $N = 3,0 \times 10^6$) dos afundamentos nos dois trechos. No Trecho 1 mediu-se ATR máximo de 2,44 mm com um volume de tráfego de cerca de 2×10^6 , enquanto que no Trecho 2, para volume de tráfego semelhante, o ATR foi cerca de 0,7 mm. Porém, para volumes de tráfego mais elevados (notadamente após $N = 5 \times 10^6$) as taxas de crescimento de deformações permanentes se tornam quase idênticas.

Como os trechos foram construídos na mesma época do ano (dezembro de 2010 e 2011), as evoluções diferentes das deformações permanentes nos primeiros tempos não parecem estar associadas à temperatura do pavimento.

Tal diferença pode, sim, ser atribuída aos comportamentos diversos dos materiais empregados na substituição de solos hidromórficos, de baixa capacidade de suporte (normalmente denominados “solos moles”), comuns no traçado ao longo da Lagoa dos Quadros, onde se encontram os dois trechos monitorados. Enquanto no Trecho 1 houve substituição desses solos por areia, no Trecho 2 foram utilizados blocos de rocha, resultando em evolução mais lenta das deformações.

A consistência desta suposição é reforçada pelas deflexões medidas durante o processo construtivo (56×10^{-2} mm no Trecho 1 e 42×10^{-2} mm no Trecho 2). Uma vez concluído o processo de pós-compactação dessas camadas inferiores, os ATRs evoluíram de forma semelhante, como explicitado pelos coeficientes angulares das retas de ajuste da Figura 13.

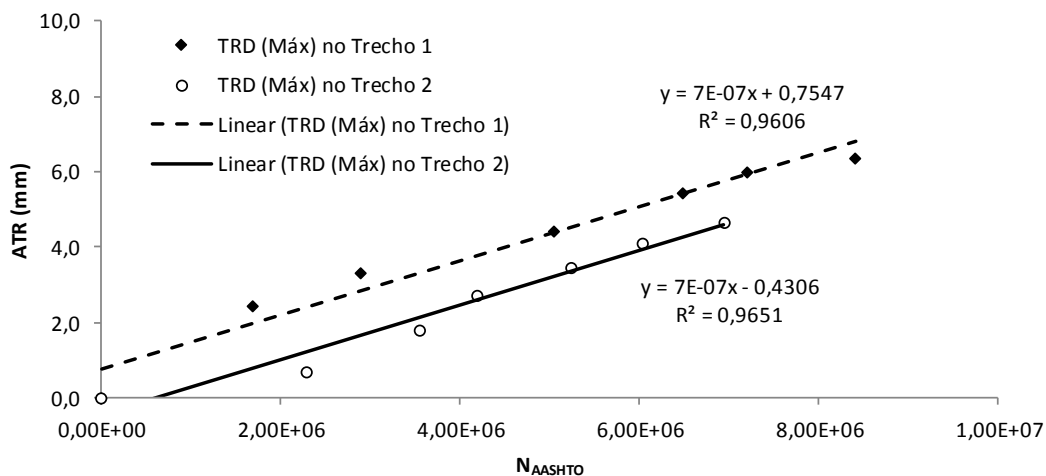


Figura 88 – Ajuste linear para evolução de deformações permanentes (ATR)

Nas Figuras 14 e 15 comparam-se os resultados de deformação permanente medidos em campo (ATR) com valores previstos pelos modelos de desempenho de Vitorello (2008), Marcon (1996) e da AASHTO (2002).

Os modelos dos dois primeiros autores preveem de forma bastante acurada a taxa de evolução das deformações, sendo o modelo de Vitorello mais próximo da realidade encontrada em campo, o que é óbvio uma vez que foi obtido a partir da análise de deformações nessa mesma rodovia, embora em pontos e épocas diferentes. Entretanto, esses modelos não apresentam acurácia nas deformações iniciais, devido à forma do ajuste linear, que não considera que nos primeiros tempos as ATRs evoluem mais rapidamente.

As previsões feitas com o modelo da AASHTO (2002) se aproximam significativamente dos dados observados em campo, com estimativas de ATR ligeiramente inferiores às medidas no Trecho 1, e valores um pouco acima dos observados no Trecho 2. De forma diferente ao observado no emprego dos outros modelos, o modelo da AASHTO (2002) permite estimar com acurácia o estágio inicial das deformações.

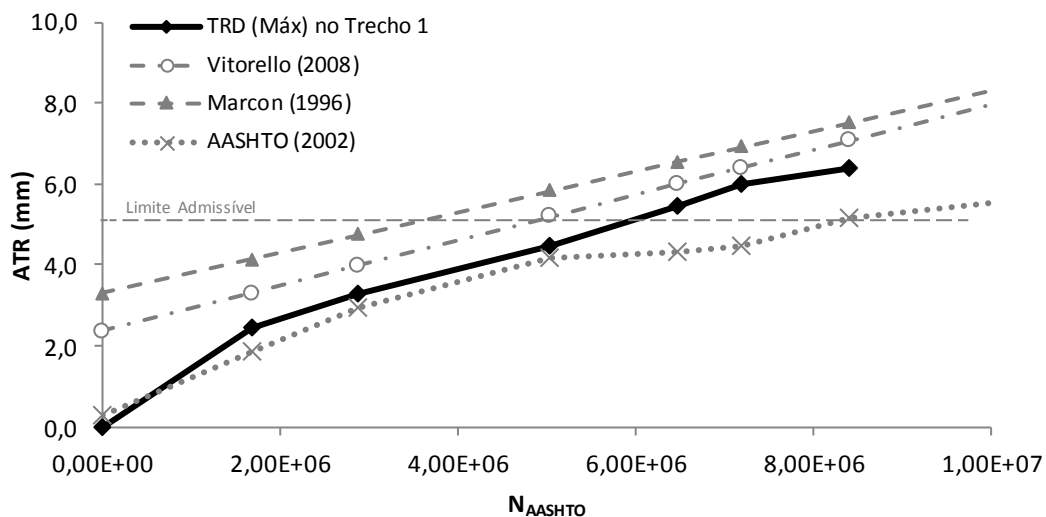


Figura 89 – Comparativo da evolução de deformação permanente dos trechos monitorados com distintos modelos de previsão de desempenho propostos

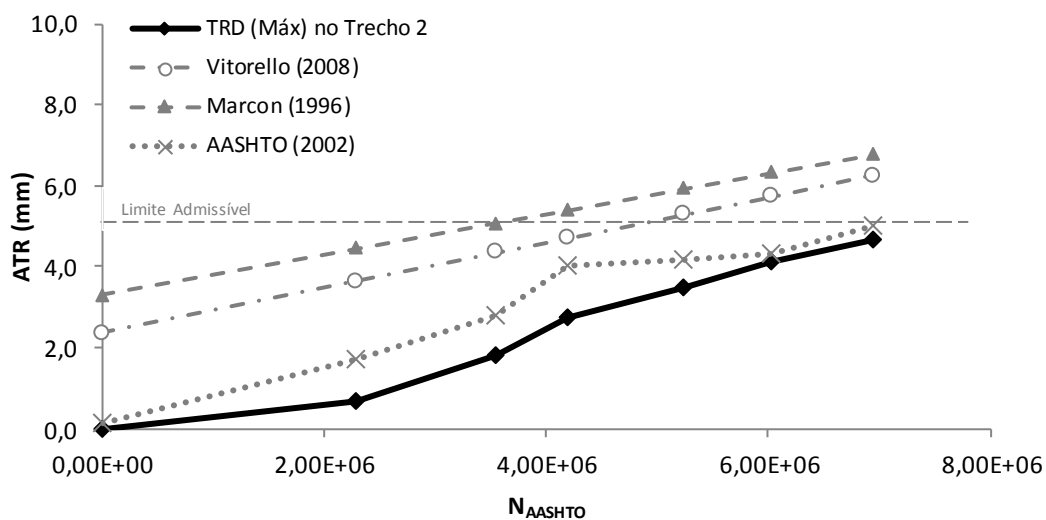


Figura 90 – Comparativo da evolução de deformação permanente dos trechos monitorados com distintos modelos de previsão de desempenho propostos

5.1.5 Avaliação Estrutural – Deflexões Viga Benkelman

Da mesma forma como foi apresentada a evolução dos parâmetros funcionais dos trechos monitorados, apresentar-se-á neste item a avaliação e análise estrutural dos trechos, através do acompanhamento da evolução das deflexões no topo do pavimento.

São apresentadas de forma gráfica as deflexões características, corrigidas em função da temperatura de realização dos ensaios defletométricos em campo. Estes valores, medidos com Viga Benkelman, são apresentados na Figura 16, em função do volume de tráfego acumulado.

Nos dois trechos a evolução das deflexões ocorreu de forma bastante semelhante, registrando-se uma forte redução nos primeiros tempos, embora no Trecho 1 essa redução seja mais notável. Essa redução corresponde a uma consolidação que ocorre nos primeiros tempos de vida do pavimento.

Após um volume de tráfego de cerca de $2,0 \times 10^6$ as deflexões se mantêm relativamente constantes, com pequenas oscilações associadas a efeitos climáticos (temperaturas elevadas ou baixas, solos e agregados mais ou menos úmidos) e ambientais (flutuações do lençol freático), o que caracteriza a chamada “fase elástica”. Nos últimos levantamentos, realizados em dezembro de 2014 e dezembro de 2015, observou-se uma tendência de redução da deflexão característica, que pode ser atribuída à secagem do subleito e das camadas de agregados pétreos.

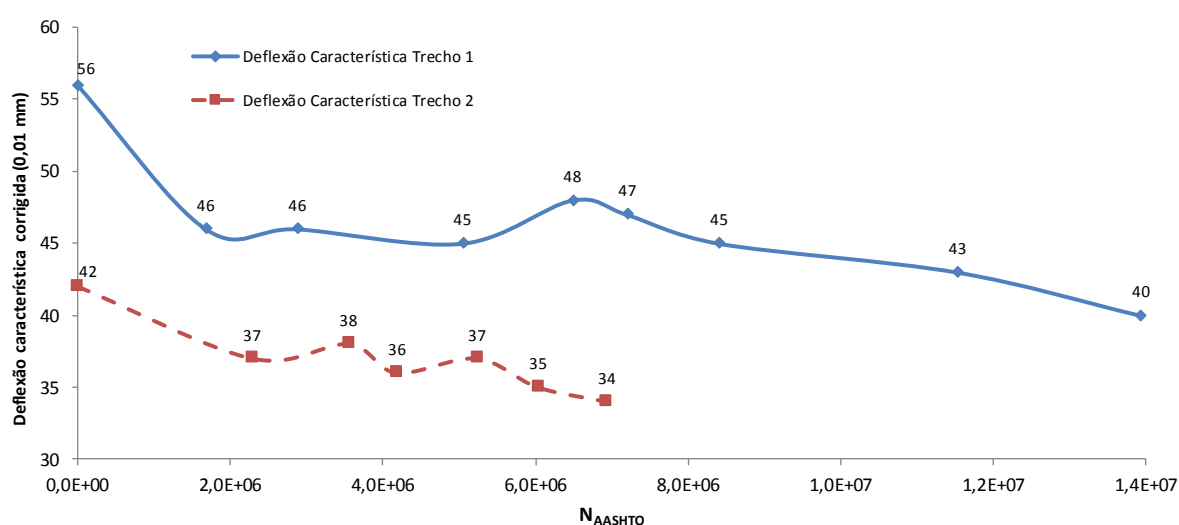


Figura 91 – Evolução das deflexões características corrigidas em função da temperatura, no decorrer do período de monitoramento, em ambos os trechos

A tendência de redução dos valores finais de deflexão característica dos trechos analisados possivelmente está relacionada à uma maior dispersão dos valores de deflexão observados em campo em função de intervenções no trecho, como a execução de remendos localizados e remendos de grandes dimensões que antecederam a execução da camada de microrrevestimento asfáltico.

Para os dados coletados realizou-se um ajuste exponencial, conforme se pode observar na Figura 92, com taxa de variação semelhante em função do nível de solicitação de tráfego.

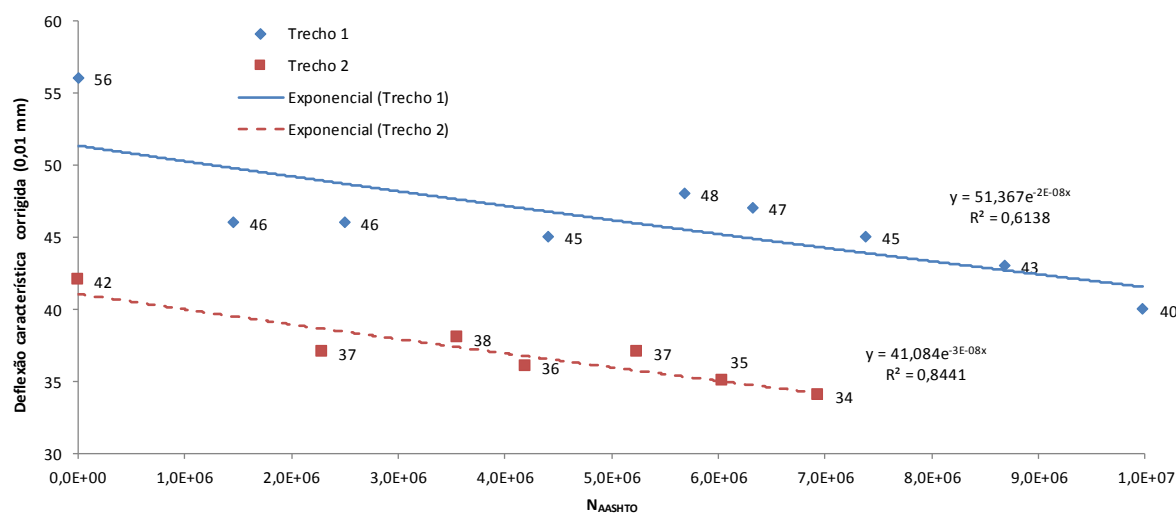


Figura 92 – Ajuste exponencial para evolução das deflexões nos trechos monitorados

5.1.6 Levantamento Visual de Defeitos (LV)

Nos trechos monitorados da BR-290/RS, foram realizados levantamentos visuais de defeitos para determinar o surgimento de patologias na camada de rolamento.

Conforme apresentado por Mattos (2014), além da irregularidade longitudinal elevada após a construção do Trecho 1, os principais defeitos superficiais observados logo após a abertura ao tráfego e início da vida útil do pavimento resumiram-se basicamente a um desgaste superficial na faixa de rolamento e um aparente polimento dos agregados. Esses defeitos, que surgiram após o 6º mês de tráfego, são mostrados na Figura 93.

Ambos os mecanismos de degradação observados afetam a textura superficial da camada de rolamento. Ainda, pode-se incluir como defeito de execução, o desnível de 4 cm existente entre a pista de rolamento e o acostamento



Figura 93 – Evolução dos defeitos superficiais durante o período de monitoramento dos trechos experimentais da BR-290/RS (Adaptado de Mattos, 2014)

Realizou-se durante o período de monitoramento o acompanhamento da evolução das manifestações patológicas, sendo possível observar após 2 anos de liberação ao tráfego o início

de um processo de arrancamento de agregados graúdos do concreto asfáltico, nas trilhas de roda, tanto no Trecho 1 quanto no Trecho 2 (incidência mais reduzida) favorecendo potenciais aberturas para infiltração de água.

Ainda segundo Mattos (2014), no mês de outubro de 2012, após uma semana de intensas chuvas na região, formaram-se panelas junto ao km 14+440. Essas chuvas, segundo o autor, foram responsáveis por causar deterioração em várias rodovias do Estado do Rio Grande do Sul. Em função disso, foi necessária a execução de um remendo de grandes dimensões, na trilha externa e centro da faixa de rolamento (2,15m de largura x 11,60m de extensão), conforme apresentado na Figura 94.



Figura 94 – Remendo superficial executado no trecho monitorado 1 da BR-290/RS após intensas chuvas (km 14+400) (Adaptado de Mattos, 2014)

As primeiras fissuras na superfície de rolamento foram observadas em março de 2013, após 27 meses de operação e N_{AASHTO} estimado¹⁴ de $6,49 \times 10^6$; no entanto, notou-se que as mesmas selavam-se naturalmente. Em julho de 2013 foram observadas as primeiras trincas na superfície, conforme é mostrado na Figura 95 (Mattos, 2014).

Em suas observações Mattos (2014) relata que as trincas observadas são nitidamente devido à fadiga do revestimento asfáltico, pois iniciaram transversalmente à faixa de rolamento e nas trilhas de rodas. Ainda como se pode observar na Figura 95 essas trincas já apresentavam bombeamento de finos. O surgimento das trincas por fadiga ocorreu aproximadamente para o tráfego de $N_{AASHTO} = 7,21 \times 10^6$.

¹⁴ Tráfego corrigido, conforme apresentado anteriormente.



Figura 95 – Surgimento das primeiras trincas de fadiga no trecho monitorado 1 após 30 meses de operação (Adaptado de Matos, 2014)

Nos 6 meses subsequentes ocorreu uma evolução dos trincamentos, fato que levou a execução, por parte da Concessionária, de uma camada de Microrrevestimento asfáltico. Esta atividade afetou significativamente as avaliações e o estabelecimento de modelos de previsão de aderência superficial da camada de rolamento (microtextura e macrotextura), alterando também os afundamentos na trilha de roda (ATR), além de comprometer a continuidade na avaliação da evolução dos trincamentos.

O aspecto das condições gerais do Trecho 1 após a etapa de manutenção é apresentado na Figura 96. Na avaliação subsequente puderam-se observar na camada de Microrrevestimento asfáltico as reflexões de trincas presentes anteriormente. Além das reflexões de trincas observou-se, em alguns locais, a exsudação de ligante asfáltico.

O surgimento de patologias no Trecho 2 ocorreu de forma mais lenta, podendo-se observar, além de um desgaste superficial da superfície de rolamento, o surgimento de pequenas fissuras iniciais após 35 meses de operação, com um NAASHTO superior a $6,0 \times 10^6$.

Como conclusão do presente item de monitoramento de desempenho dos trechos experimentais da BR-290/RS realizou-se uma associação tráfego solicitante (NAASHTO) com o surgimento dos principais mecanismos de degradação e a evolução das condições funcionais e estruturais do pavimento analisado. Estes dados estão apresentados na Tabela 33 a seguir.



Figura 96 – Aspecto da superfície de rolamento após a execução da camada de Microrrevestimento asfáltico no Trecho 1, apresentando exsudação e reflexão de trincas

Tabela 33 – Incidência de defeitos nos trechos da BR-290 em função do Tráfego (N_{AASHTO})¹⁵

Defeito	RESUMO SURGIMENTO DE PRINCIPAIS PATOLOGIAS	TRÁFEGO
		N_{AASHTO}
TRINCAMENTO	T1 - Surgimento primeiras fissuras (healing)	4,00E+06
	T1 - Início Trincamento	6,49E+06
	T1 - Trincas bombeamento finos	7,21E+06
	T1 - Microrrevestimento Asfáltico	8,00E+06
	T1 - Reflexão de trincas microrrevestimento	1,00E+07
	T2 - Surgimento primeiras fissuras	5,24E+06
	T2 - Início Trincamento	6,04E+06
	T2 - Trincamento com pouca propagação	6,94E+06
DESGASTE	T1 - Detecção de desgaste inicial	2,88E+06
	T1 - Desgaste e arrancamento agregados	5,05E+06
	T2 - Detecção de desgaste inicial	2,29E+06
	T2 - Desgaste superficial	5,24E+06
	T1 - Perda de Marcotextura: Grossa - Média	2,88E+06
	T1 - Perda de Marcotextura: Média - Fina	1,00E+07 *
	T2 - Perda de Marcotextura: Grossa - Média	2,29E+06
	T2 - Perda de Marcotextura: Média - Fina	6,94E+06 *
ATR	T1 - ATR (4,00mm)	4,00E+06
	T1 - ATR (5,00mm)	6,07E+06
	T2 - ATR (4,00mm)	6,00E+06
	T2 - ATR (5,00mm)	7,75E+06 *

¹⁵ *: Valores estimados. Limite ainda não atingido durante o período de monitoramento atual.

5.2 Análise de Desempenho dos Trechos Monitorados na BR-448/RS

A seguir serão apresentadas as atividades referentes ao monitoramento pós-execução de dois trechos da BR-448/RS. Os resultados apresentados correspondem ao período inicial de operação da rodovia, ou seja, de 20/12/2013 data de abertura da rodovia ao tráfego à 23/01/2016, data do último monitoramento realizado para avaliação na presente tese.

A Figura 97 apresenta um breve aspecto da rodovia, conforme já descrito na metodologia de pesquisa e as datas dos monitoramentos realizados juntamente com as respectivas estimativas de tráfego (N_{AASHTO}).

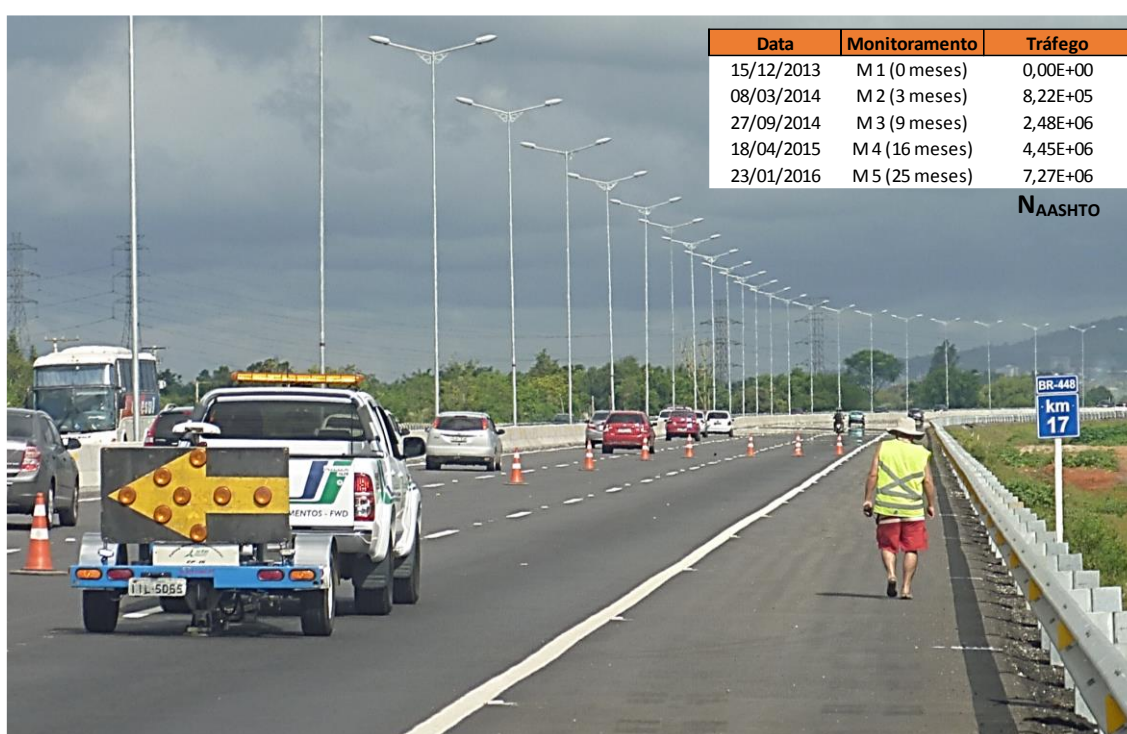


Figura 97 – Rodovia BR-448/RS, aspectos gerais e datas de levantamentos realizados

São apresentadas a seguir as principais atividades desenvolvidas para avaliação de desempenho dos trechos implantados que, consistem no acompanhamento sistemático da evolução de parâmetros de desempenho funcional e estrutural dos trechos implantados, tais como, irregularidade longitudinal (na escala IRI), macrotextura superficial (através do ensaio de Altura de Mancha de Areia - Hs), microtextura superficial (avaliada com o Pêndulo Britânico - BPN), afundamentos nas trilhas de roda (ATR), levantamento de defeitos (LVC) e avaliação de deflexões do pavimento com emprego de equipamento FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

A avaliação dos parâmetros acima descritos será realizada em função do tempo de serviço do pavimento, ou seja, em função do volume de tráfego que solicitou o trecho monitorado desde sua abertura ao tráfego.

5.2.1 Avaliação de Irregularidade Longitudinal (IRI) com Perfilômetro Laser

A evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) nos dois trechos da BR-448/RS durante o período de monitoramento é apresentada na Figura 98. Logo após a construção, o Trecho 1 apresentou IRI menor do que o Trecho 2, valores de 1,33 m/km e 1,49 m/km, respectivamente.

Porém, ao observar a evolução do parâmetro durante os dois primeiros anos, nota-se uma aproximação dos valores, ou seja, o Trecho 1 apresenta uma taxa de evolução mais elevada o que Trecho 2. Após os primeiros 25 meses de operação, os dois trechos encontram-se com valores de irregularidade de 1,53 m/km (Trecho 1) e 1,56 m/km (Trecho 2).

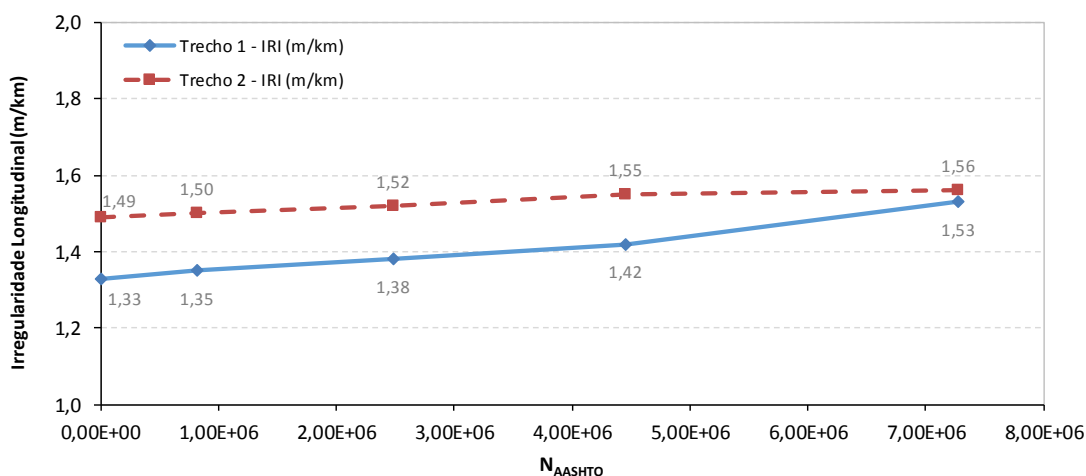


Figura 98 – Evolução da irregularidade longitudinal dos trechos monitorados 1 e 2

No Projeto Executivo do Pavimento especificou-se que a superfície de acabamento da camada final de CA deveria apresentar um IRI Máximo de 2,5 m/k em 100% do segmento amostrado e que obrigatoriamente em 95% do segmento o IRI não deveria ser superior a 2,0.

Tanto os valores pós-execução quanto os medidos até o último levantamento são bastante baixos de irregularidade, classificado, segundo o DNIT, como um pavimento na condição “boa ou ótima”, o que atesta um bom processo de executivo e uma leve evolução da irregularidade com o decorrer da vida útil do pavimento.

Conclui-se que os limites especificados no projeto foram atendidos, e que embora os valores tenham aumentado ligeiramente durante os 12 primeiros, em 100% dos pontos amostrados a irregularidade longitudinal se manteve abaixo do limite estabelecido em projeto (2,5m/km).

Na Figura 99 é apresentado um comparativo da evolução da irregularidade longitudinal medida e prevista pelos modelos de Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996), Yshiba (2003) e Vitorello (2008).

Novamente, confrontando os valores medidos com aqueles estimados pelos modelos de previsão de desempenho, constata-se que os que previram com maior acurácia a evolução da irregularidade foram os modelos propostos de Vitorello (2008) e Paterson (1987), mesmo que apresentem taxas de evolução mais pessimistas. A irregularidade prevista pelos demais modelos subestimaram a serventia do pavimento, que é função principalmente da irregularidade.

A acurácia razoável das previsões feitas com o modelo de Vitorello (2008) se justifica por ter sido obtido em região com clima semelhante, embora as estruturas de pavimentos sejam muito diferentes (especialmente no que diz respeito a espessuras de camadas asfálticas). Já a similitude entre os valores medidos e os estimados pelo modelo de Patterson (1987) pode ser atribuída ao fato de que este modelo considera o valor inicial da irregularidade.

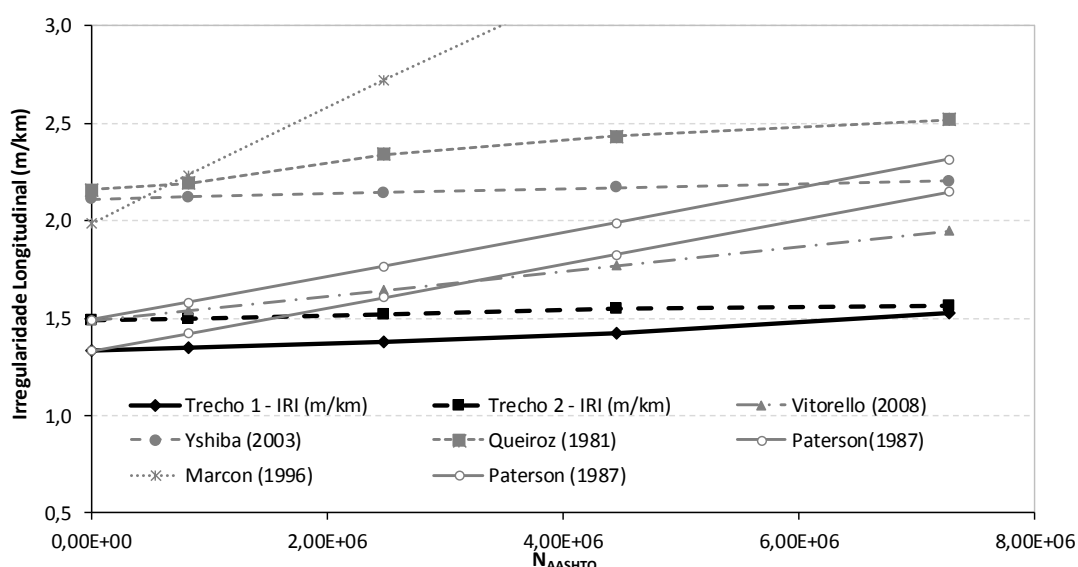


Figura 99 – Comparativo entre a evolução de irregularidade longitudinal nos trechos monitorados e a previsão feita com distintos modelos de desempenho

Para os dados observados em campo, o modelo de evolução do IRI durante o período de monitoramento pôde ser definido através de um ajuste linear em função do tráfego, conforme é apresentado na Figura 100 a seguir.

Pode-se observar com os ajustes uma taxa de crescimento mais acentuada no Trecho 1 em relação ao Trecho 2. Este diferencial na evolução da irregularidade pode estar diretamente associado à solução adotada no subleito, onde no Trecho 1 foi realizado o adensamento do subleito com instalação de geodrenos. Possíveis evoluções dos recalques podem estar afetando a estrutura do pavimento e levando a esta evolução diferenciada do IRI em relação ao Trecho 2, no qual foi realizada a remoção e substituição dos solos compressíveis.

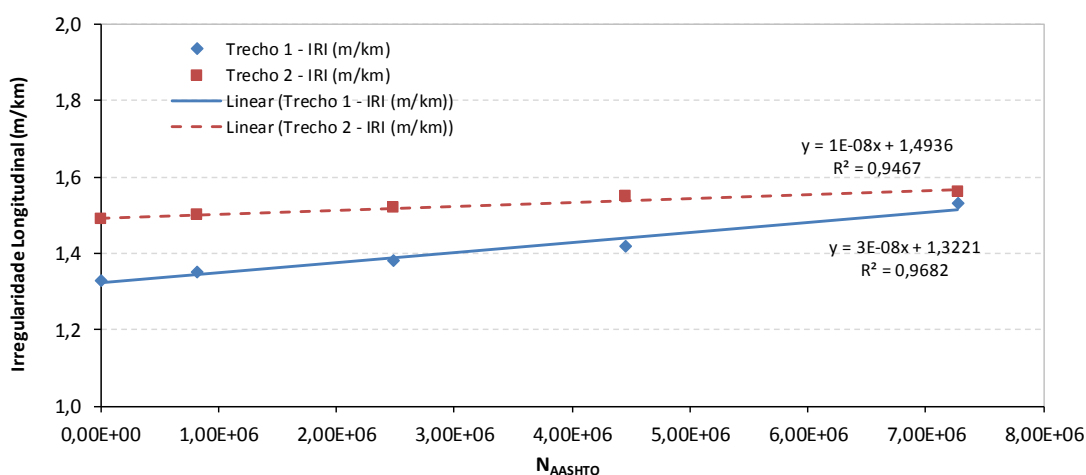


Figura 100 – Ajuste linear para evolução da irregularidade longitudinal

5.2.2 Determinação Macrotextura Superficial através do Ensaio de Altura de Mancha de Areia (Hs)

O ensaio de mancha de areia empregado para determinar a macrotextura caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento e quantifica a distância média entre os grânulos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento.

Na Figura 101 são apresentados os valores médios de altura de areia (HS) obtidos para ambos os trechos durante os primeiros dois anos de operação da rodovia. É possível observar uma redução significativa (mais acentuada no Trecho 2) de macrotextura no período analisado. Logo após a construção ambos os trechos apresentavam-se dentro dos limites de macrotextura MÉDIA.

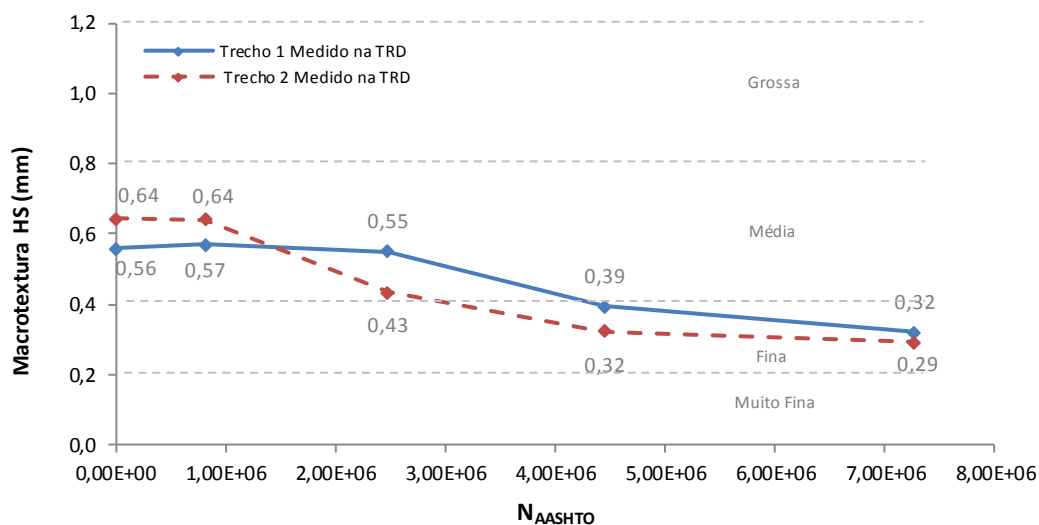


Figura 101 – Evolução da macrotextura superficial dos trechos monitorados 1 e 2

Os valores médios de macrotextura são bastante semelhantes para ambos os trechos, porém dois aspectos merecem especial atenção na avaliação deste parâmetro nos trechos em questão.

O primeiro aspecto diz respeito à qualidade de execução do revestimento. Ao analisar a superfície da camada de rolamento observa-se uma mistura asfáltica com muita segregação. Já o segundo aspecto importante é a ocorrência de uma ligeira perda de textura superficial, caracterizada por um polimento dos agregados.

Os resultados correspondentes aos primeiros dois anos de acompanhamento são apresentados na Figura 102 juntamente com os valores dos quatro primeiros monitoramentos anteriormente realizados, ou seja, logo após a construção (L ZERO), um mês após a abertura da rodovia ao tráfego (L 1Mês), após seis meses (L 6 Meses), após 12 meses (L 12 Meses) e após dois anos de abertura da rodovia (L 24 Meses).

Observa-se elevada variabilidade inicial dos resultados ao longo dos trechos; variabilidade que é mais acentuada no Trecho 2. Como já comentado, a variabilidade observada em campo está associada à segregação da mistura asfáltica durante a aplicação da camada de rolamento, fato este que levou a formação de segmentos com grande incidência de agregados graúdos (maior índice de vazio superficial) e outros segmentos com quase nenhuma incidência de agregados graúdos (mistura fina e bastante fechada). Estas características e sua influência nos ensaios podem ser observadas na Figura 103 e Figura 104.

Após a abertura ao tráfego e com o monitoramento do 12º mês de operação pôde-se constatar uma rápida perda de textura superficial (desgaste e polimento dos agregados) com valores atuais variando basicamente dentro dos limites da classificação FINA para ambos os trechos. O estado atual da superfície inspira cuidados quanto à segurança dos usuários, com risco de formação de película de água na superfície, além de problemas de aderência pneu/pavimento.

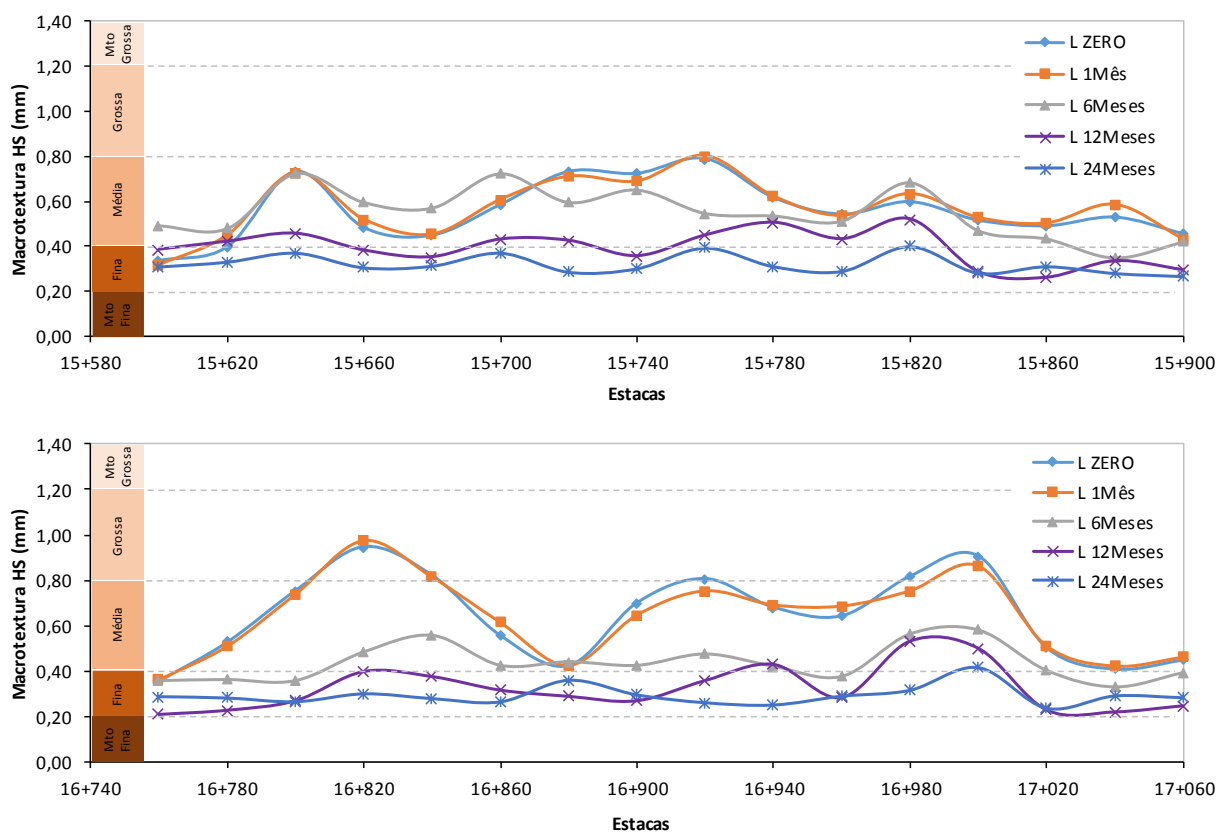


Figura 102 – Resultados de macrotextura ao longo dos trechos 1 e 2, determinados através da Mancha de Areia correspondentes aos 24 primeiros meses de operação



Figura 103 – Desgaste superficial dos agregados levando a uma redução significativa de macrotextura nos dois primeiros anos de operação (BR-448/RS trecho 1 e trecho 2)



Figura 104 – Segregação da mistura asfáltica ocasionando elevada variabilidade nos reultados de macrotextura superficial (BR-448/RS trecho 1 e trecho 2)

Conforme observado em campo, a interação entre o rápido desgaste superficial e a segregação da mistura asfáltica levam a um revestimento com uma superfície perigosamente lisa. Ensaio laboratoriais de abrasão realizados nos agregados apontaram valores aceitáveis, dentro das especificações, com perdas em torno de 26% na máquina de abrasão Los Angeles.

Considerando a média dos valores ao longo dos trechos estabeleceram-se modelos exponenciais para a evolução da macrotextura superficial nos trechos da BR-448/RS, mostrados na Figura 105.

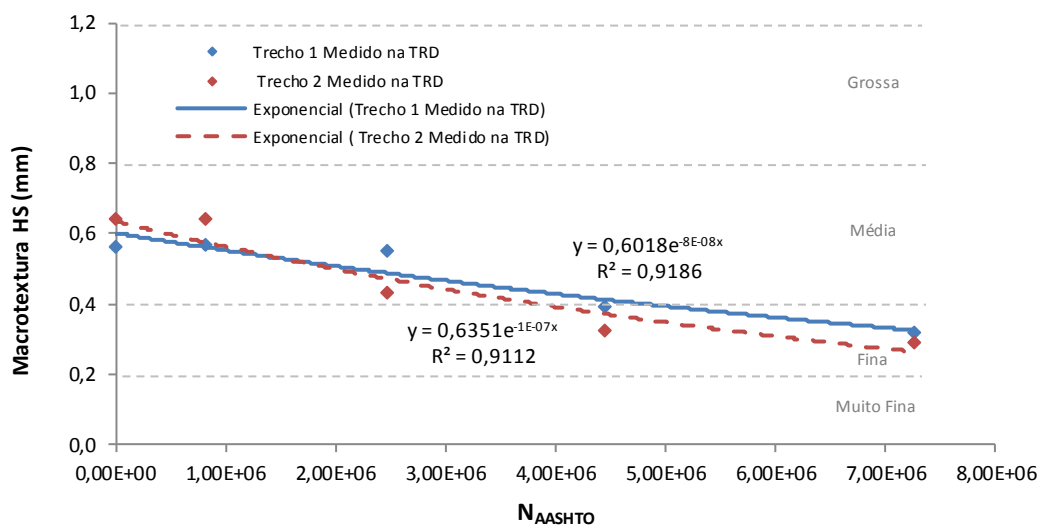


Figura 105 – Ajuste exponencial para evolução da macrotextura superficial

No gráfico a seguir, Figura 106, mostra-se um comparativo dos dados de macrotextura obtidos em campo com o modelo proposto por Mattos (2009). O modelo, por apresentar a consideração do valor inicial de Hs em sua formulação consegue prever os dados iniciais observados em campo.

Porém, como esta propriedade é muito dependente do tipo de mistura asfáltica aplicada no revestimento e do tipo de agregado mineral empregado (origem e formação), após os primeiros meses de tráfego os valores previstos pelo modelo distanciaram-se dos dados reais, mantendo-se estáveis enquanto os dados de campo experimentavam uma queda significativa.

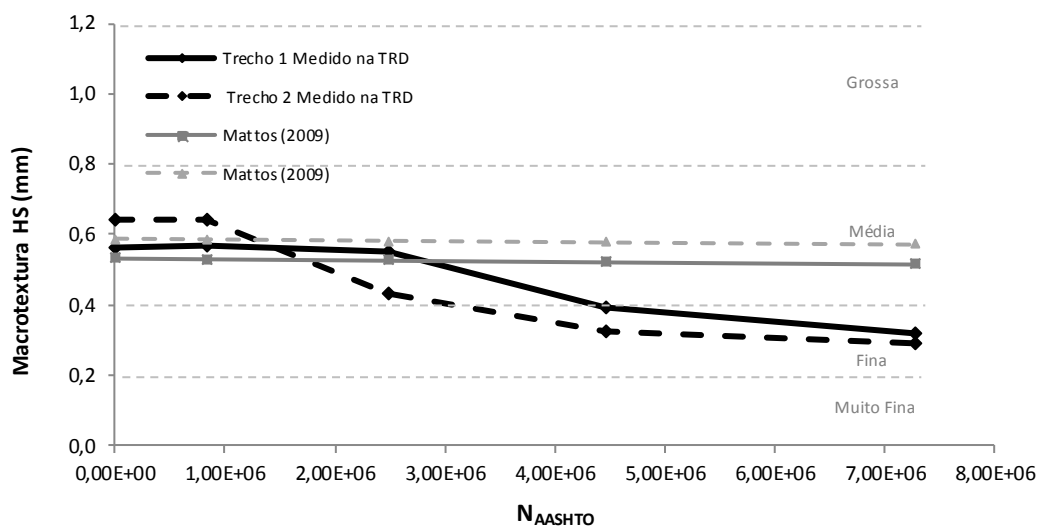


Figura 106 – Comparativo da evolução de macrotextura superficial dos trechos monitorados com valores previstos pelo modelo proposto por Mattos (2009)

5.2.3 Determinação Microtextura Superficial com o Pêndulo Britânico (BPN)

A medição do atrito no revestimento dos trechos monitorados foi obtida por meio de avaliações com o Pêndulo Britânico, com determinação da resistência à derrapagem, através do BPN (*British Pendulum Number*).

Os valores médios obtidos em ambos os trechos da BR-448/RS são apresentados na Figura 107. Inicialmente, os valores médios no trecho 2 (BPN = 81,5) eram significativamente maiores que no trecho 1 (BPN = 71,5). Porém, após dois anos de tráfego (levantamento realizado em janeiro de 2016), devido a uma queda mais acentuada de resistência à derrapagem no Trecho 2, a microtextura nos dois trechos apresenta-se muito semelhante.

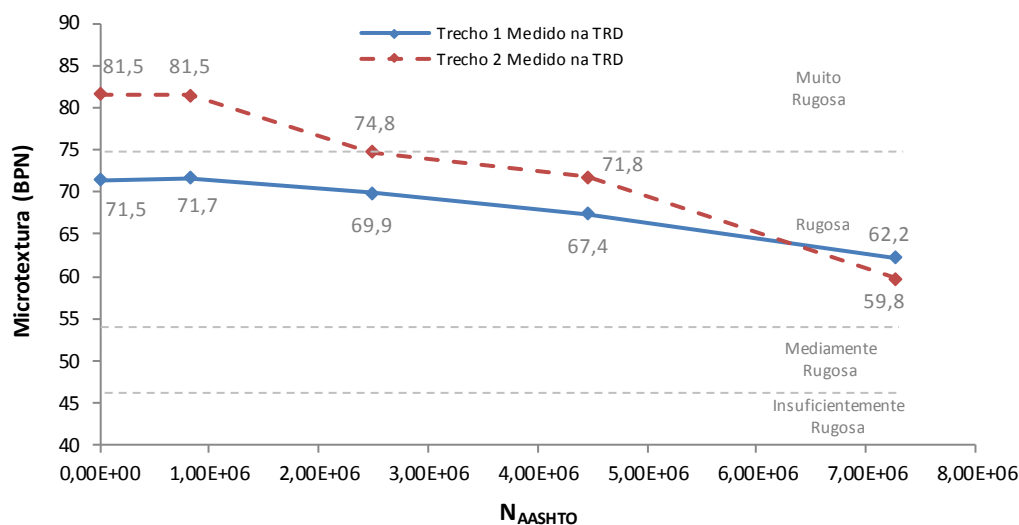


Figura 107 – Evolução da microtextura superficial nos trechos monitorados da BR-448/RS

Uma grande variabilidade nos resultados de resistência à derrapagem foi observada em ambos os trechos em função da segregação da mistura asfáltica, como comentado no item anterior.

Ao contrário do observado nos valores de macrotextura, houve uma maior variabilidade inicial nos valores de BPN no primeiro trecho, onde a classificação variou entre RUGOSA e MUITO RUGOSA, conforme gráfico da Figura 108. Para ao segundo trecho, com exceção de poucos valores, a classificação ficou dentro dos limites de uma superfície MUITO RUGOSA.

Durante o período de monitoramento observou-se uma tendência de homogeneização dos resultados acompanhada de uma queda nos valores de resistência à derrapagem. Após 24 meses de monitoramento da resistência à derrapagem, em sua grande maioria os valores de microtextura localizaram-se na condição RUGOSA para ambos os trechos monitorados. Com exceção apenas para as estacas iniciais do Trecho 2, onde a condição observada está localizada próximo do intervalo de microtextura MUITO RUGOSA.

Valores observados após os 24 primeiros meses de monitoramento demonstram uma leve perda de rugosidade superficial em comparação com os resultados levantados após 12 meses de operação da rodovia, demonstrando uma possível estabilização dos valores. Os resultados de BPN obtidos nos monitoramentos dos primeiros 24 meses estão apresentados na Figura 108.

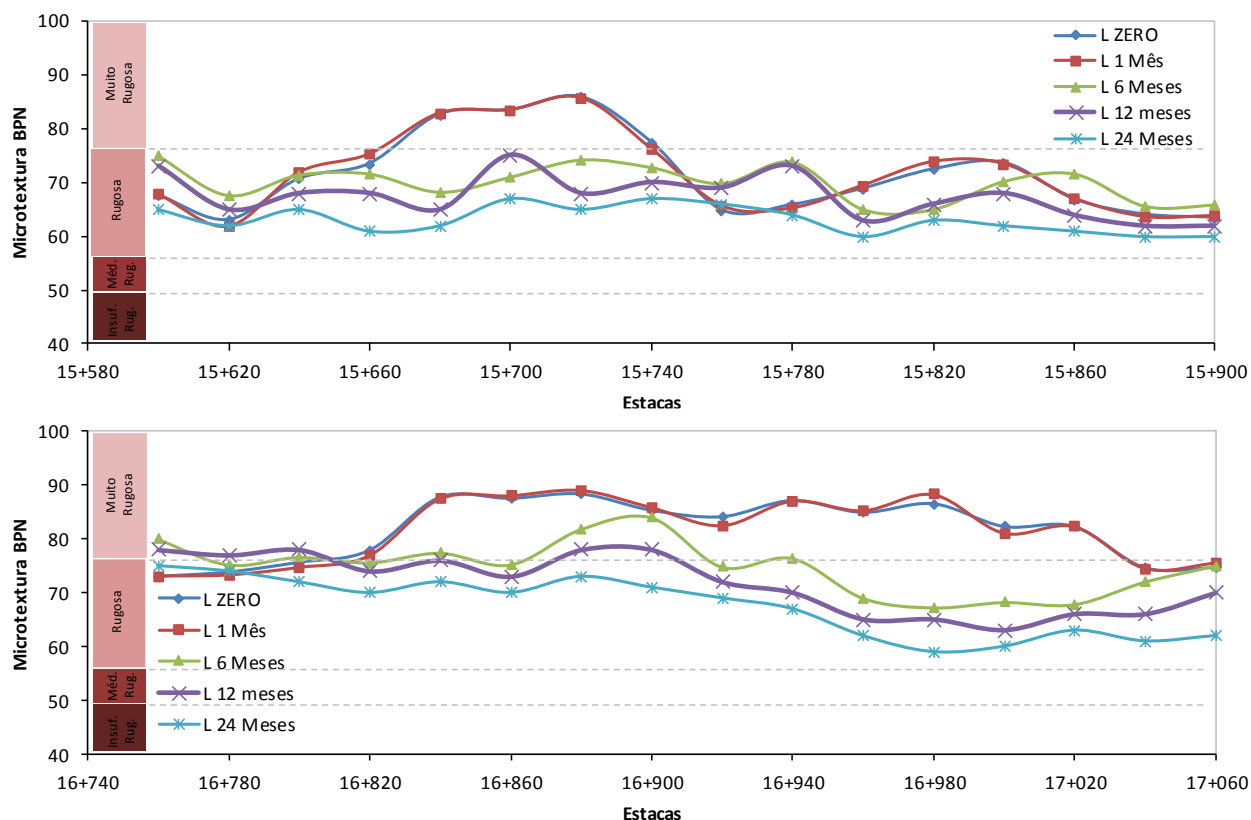


Figura 108 – Resultados comparativos de microtextura determinados através do Pêndulo Britânico correspondentes aos 24 meses de operação (BR-448/RS Trecho 1 e Trecho 2)

A evolução dos valores de resistência à derrapagem observados em campo foi comparada com os previstos pelo modelo de redução proposto por Mattos (2009). Como esse modelo considera o valor inicial de BPN em sua formulação, foi possível prever com bastante acurácia a evolução inicial da microtextura superficial (até $N=2,5 \times 10^6$, aproximadamente) no Trecho 1. Entretanto, os valores previstos se afastam muito dos observados para tempos maiores, como pode ser observado no gráfico da Figura 109.

Sendo a microtextura uma propriedade fortemente dependente do agregado mineral, não era de se esperar que o modelo de Mattos (2009). O modelo, por apresentar a consideração do valor inicial de Hs em sua formulação consegue prever bem os dados iniciais, principalmente no que diz respeito ao Trecho 1, porém não acompanha a queda considerável dos valores subsequentes conforme pode ser observado. De fato, no trecho 2, já após os primeiros meses de tráfego ($N \geq 10^6$), os valores observados afastaram-se significativamente dos previstos pelo modelo.

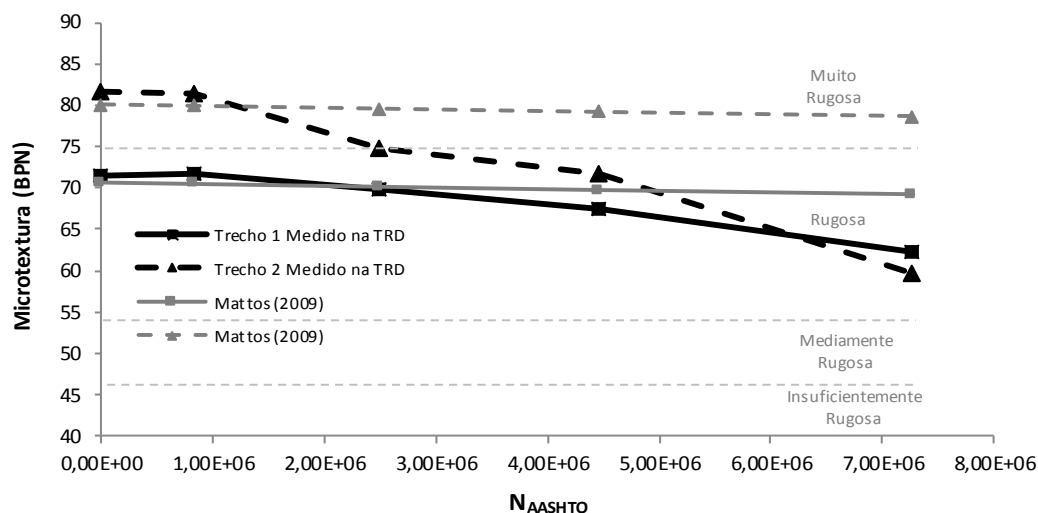


Figura 109 – Comparativo da evolução de microtextura superficial dos trechos monitorados com modelo de previsão de desempenho proposto por Mattos (2009)

Através dos monitoramentos realizados foi possível estabelecer um ajuste exponencial para analisar a evolução da microtextura superficial de ambos os trechos da BR-448/RS. É possível observar na Figura 110 um declínio muito mais acentuado para o Trecho 2, trecho este que inicialmente apresentava valores consideravelmente mais elevados em relação ao Trecho 1 logo após a construção da rodovia.

De acordo com as informações de projeto e de acompanhamento da execução, os agregados de ambos os trechos são provenientes de uma mesma jazida de extração, possíveis mudanças na frente de extração ou qualidade dos agregados pétreos podem levar a uma explicação sobre a perda de resistência à derrapagem mais significativa de um trecho em relação ao outro.

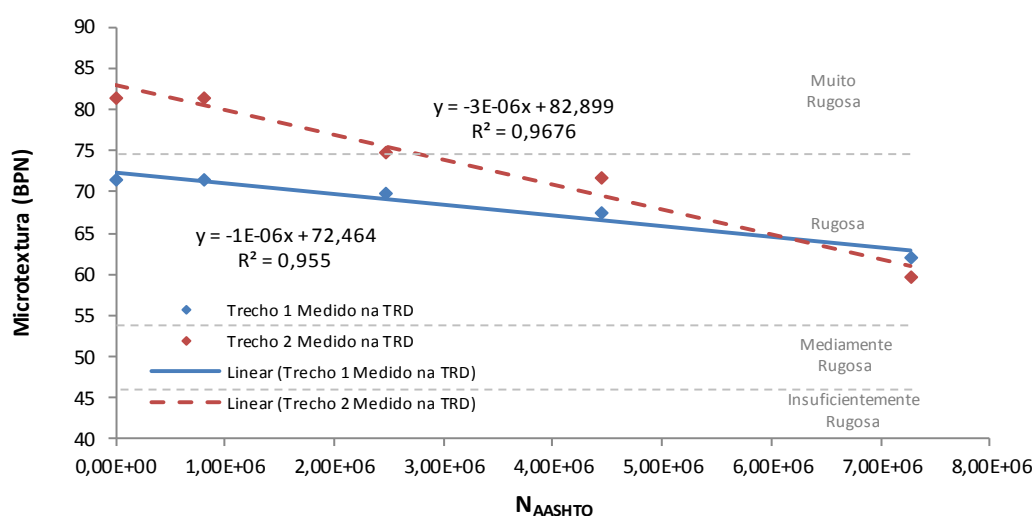


Figura 110 – Ajuste exponencial para evolução da microtextura superficial

5.2.4 Afundamentos nas Trilhas de Roda (ATR)

Ao avaliar os afundamentos nas trilhas de roda dos trechos da BR-448/RS não se observou uma diferença tão acentuada entre as deformações nas trilhas de rodas externas e internas quanto às observadas nos trechos da BR-290/RS.

Ambos os trechos encontram-se em seção de aterro, porém às soluções nas camadas inferiores de suporte do pavimento foram diferentes. No Trecho 1 realizou-se o adensamento da camada de solo compressível do subleito através da implantação de geodrenos verticais. Já no Trecho 2 a camada de solo com baixa capacidade de suporte foi totalmente removida e realizou-se uma recomposição com areia.

Para as deformações permanentes observadas na superfície do pavimento, os valores observados no segundo trecho foram ligeiramente superiores aos do primeiro trecho. Após dois anos de operação, com um tráfego estimado de $N_{AASHTO} 7,27 \times 10^7$ os valores de deformação permanente nas trilhas de roda (ATR) aproximam-se do valor de 5 mm, com ATR médio de 4,8mm no trecho 1 e 4,7mm no Trecho 2 (Figura 111).

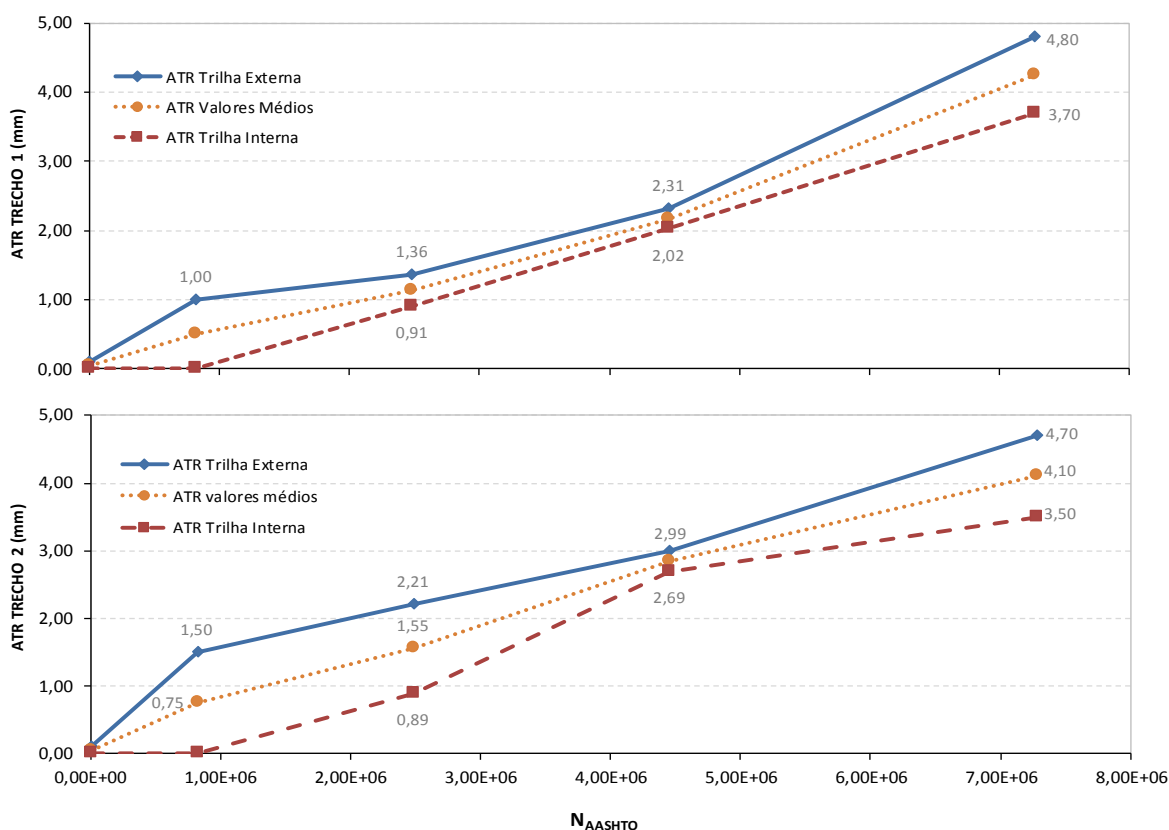


Figura 111 – Evolução de ATR na trilha interna, trilha externa e valores médios ao longo do período de monitoramento em ambos os trechos da BR-448/RS

Ao observar a evolução de ATRs máximos apresentada na Figura 112, podem-se notar afundamentos iniciais superiores no segundo trecho, que após acumularem 1,5 mm cresceram com taxa constante. Já o afundamento máximo no Trecho 1 foi sempre menor até o último levantamento, quando superou ligeiramente (4,8 mm) o valor medido no Trecho 2 (4,7 mm). Como se observa na Figura 37, entre o último e o penúltimo levantamento, o ATR máximo aumentou muito mais no Trecho 1 (variação de 2,5 mm) do que no 2 (variação de 1,7 mm).

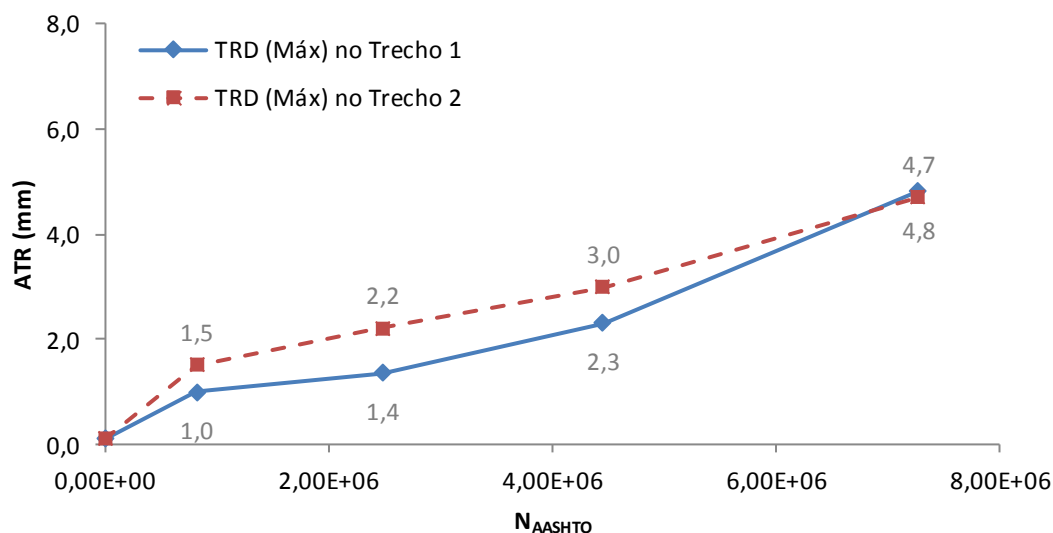


Figura 112 – Evolução de ATR, com valores máximos (medidos na trilha externa) no decorrer do período de monitoramento para ambos os trechos

Dada à continuidade física dos trechos monitorados, as estruturas de pavimento, as condições climáticas e o tráfego atuante são idênticos; portanto, as diferentes evoluções das deformações permanentes somente podem ser atribuídas aos diferentes modos de tratamento dos solos moles do subleito (geodrenos no trecho 1 e substituição de solos moles por areia no trecho 2).

Contudo, ao modelar-se linearmente a evolução das deformações, constata-se que a taxa de crescimento (explicitada pelo coeficiente angular do modelo linear) é praticamente idêntico em ambos os trechos, como se mostra na Figura 113. As diferenças mais significativas se dão nos valores do parâmetro linear (intercepto com o eixo das ordenadas), que explicita as diferenças construtivas.

A seguir, na Figura 114 comparam-se as evoluções de ATRS medidos em campo com previsões feitas pelos modelos de Vitorello (2008), Marcon (1996) e AASHTO (2002), sendo este último aquele que melhor se ajusta aos dados observados em campo.

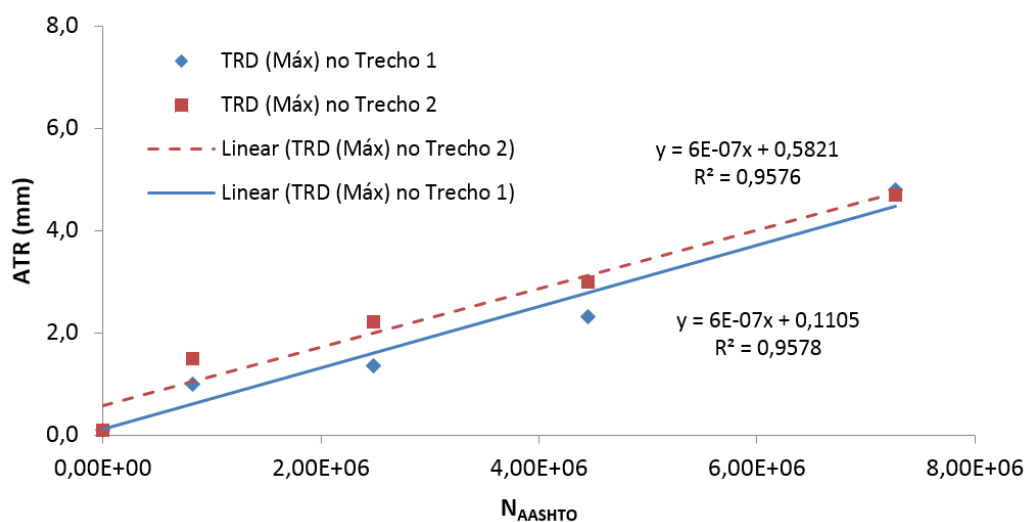


Figura 113 – Ajuste linear para evolução de deformações permanentes (ATR)

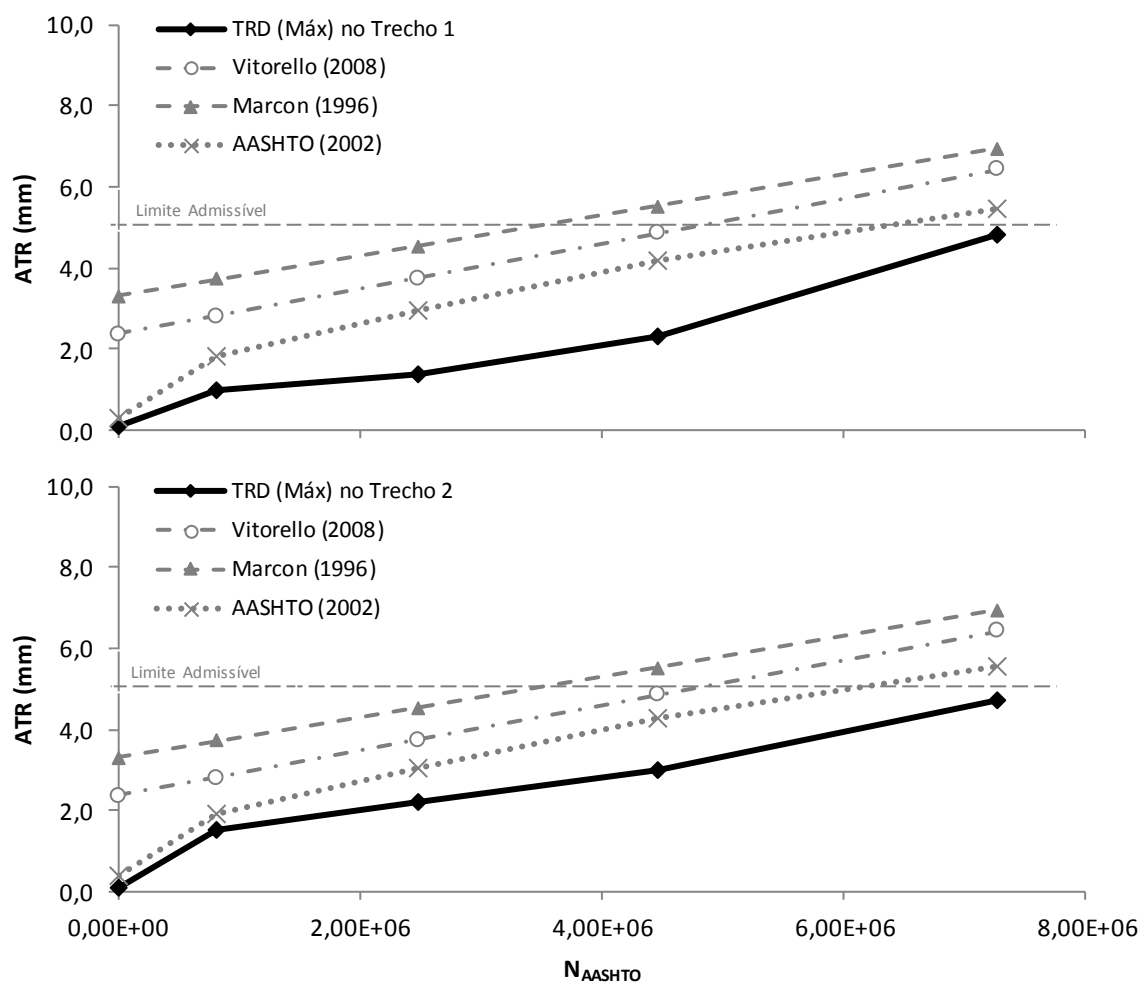


Figura 114 – Comparativo da evolução de deformação permanente dos trechos monitorados com distintos modelos de previsão de desempenho propostos

5.2.5 Avaliação Estrutural – Deflectômetro de Impacto FWD

Serão apresentados neste item os valores de evolução das deflexões ao longo do período de 24 meses de monitoramento. Na Figura 115 e na Figura 116 são apresentados os resultados de deflexão máxima e das bacias de deflexão do último levantamento realizado (24 meses).

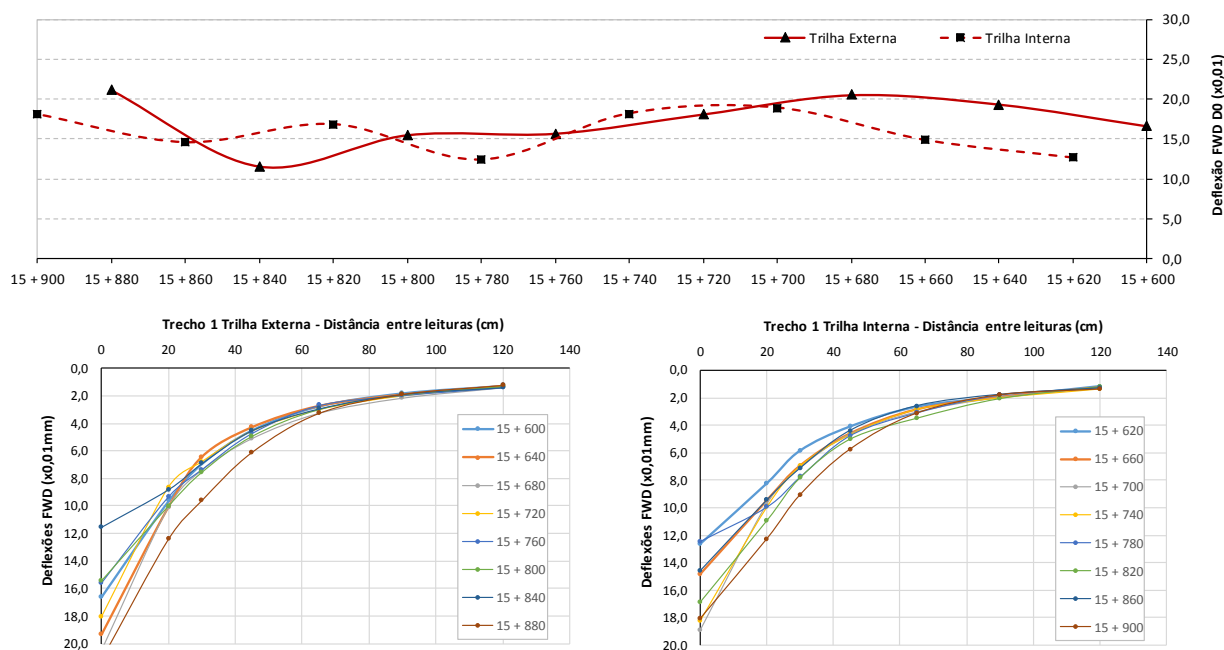


Figura 115 – Deflexão máxima D_0 do Trecho 1 e bacias de deflexão ao longo do trecho na trilha de roda interna e externa após 24 meses de operação

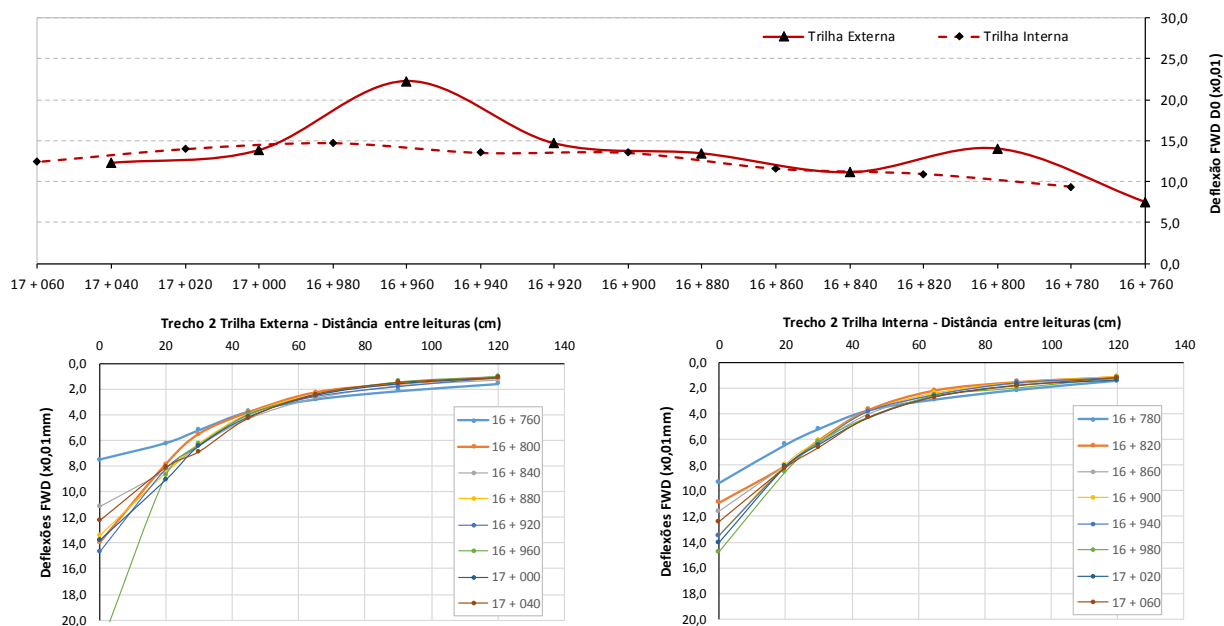


Figura 116 – Deflexão máxima D_0 do Trecho 2 e bacias de deflexão ao longo do trecho na trilha de roda interna e externa após 24 meses de operação

De forma geral os valores de deflexão são bastante baixos, isso devido à robustez da estrutura do pavimento. Uma variabilidade maior observada em relação à deflexão máxima principalmente na trilha externa atingindo valores máximos de $21,2 \times 10^{-2} \text{mm}$ (Trecho 1) e $22,2 \times 10^{-2} \text{mm}$ (Trecho 2) e valores mínimos observados de $11,5 \times 10^{-2} \text{mm}$ e $7,5 \times 10^{-2} \text{mm}$, para o Trecho 1 e Trecho 2, respectivamente.

A partir de dados dos levantamentos defletométricos realizados periodicamente foi definida uma bacia de deflexão característica para cada trecho de acordo com cada período de monitoramento (inicial, 6 meses, 12 meses e 24 meses). Estas bacias defletométricas características estão apresentadas nos gráficos da Figura 117 e a partir destes dados foram definidas as variações de deflexão nos trechos durante o período de monitoramento.

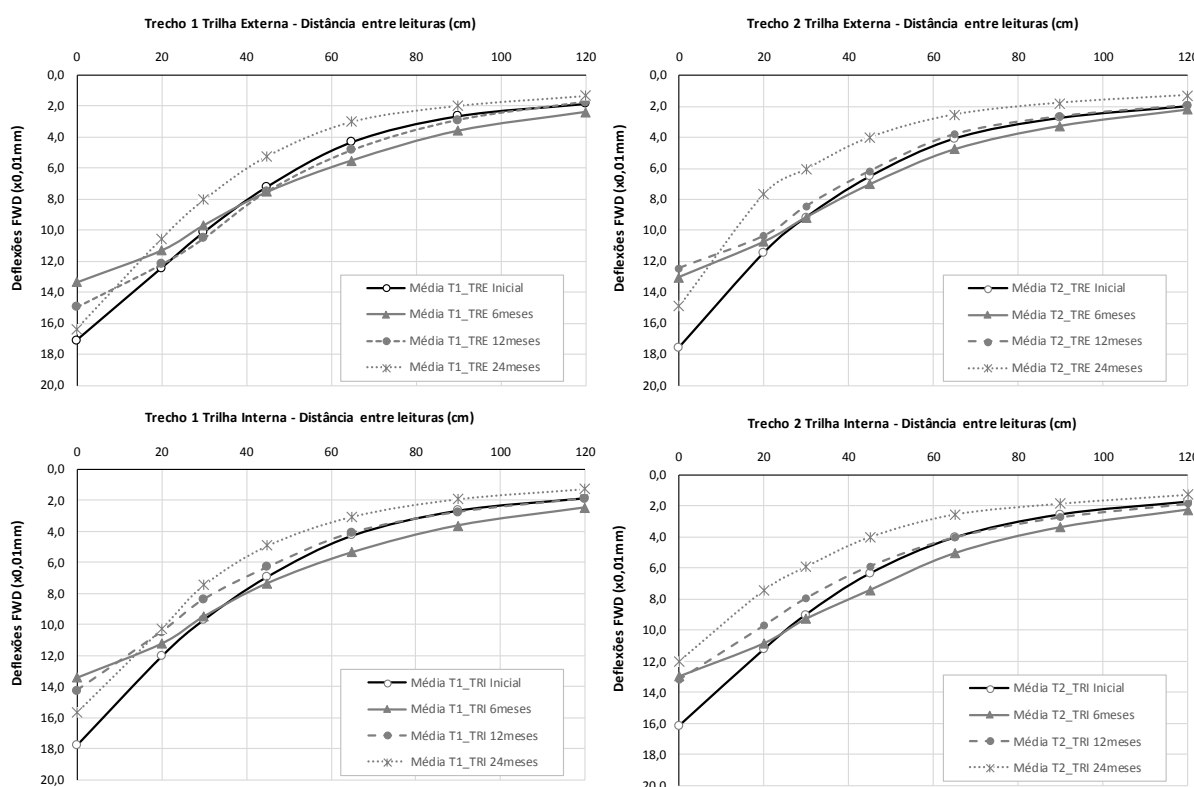


Figura 117 – Valores médios para bacias de deflexão nas trilhas de roda (interna e externa) em ambos os trechos (Trecho 1 e Trecho 2) em função do tempo de abertura ao tráfego

É possível observar uma evolução muito semelhante da deflexão máxima com o passar do tempo, somente após um tráfego de $2,48 \times 10^6$ o Trecho 1 começa a apresentar deflexões ligeiramente superiores ao Trecho 2 (Figura 118).

No último levantamento defletométrico realizado observa-se uma elevação dos níveis de deflexão em relação aos levantamentos anteriores, para este fato vale ressaltar que o ensaio foi realizado a temperaturas elevadas do pavimento (próximas a 50°C). Mesmo com a correção das deflexões para valores característicos a 20°C, a magnitude das leituras possivelmente apresentasse com influência da temperatura de realização do ensaio.

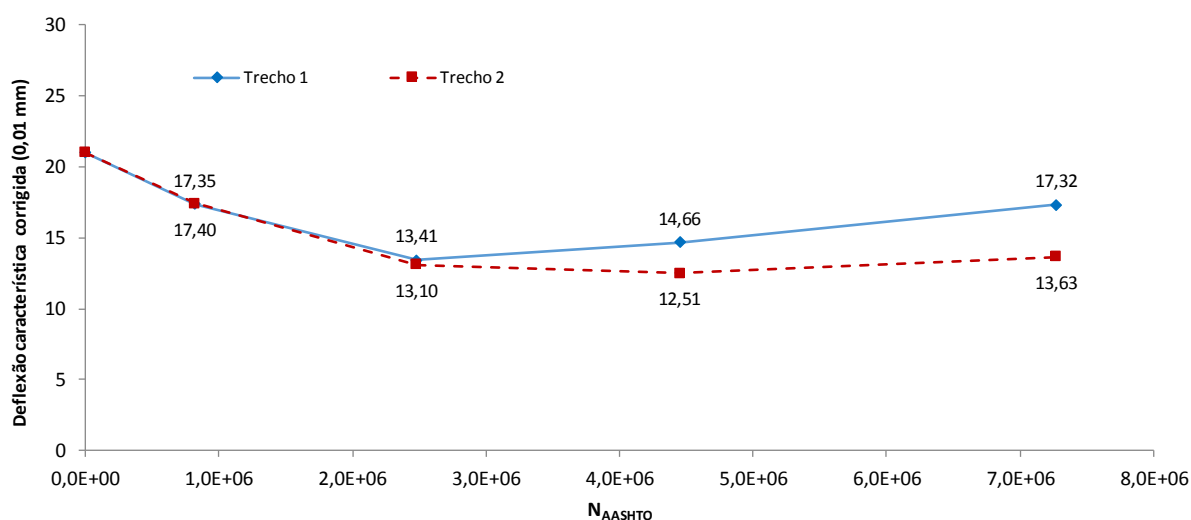


Figura 118 – Evolução das deflexões corrigidas em função da temperatura, no decorrer do período de monitoramento, em ambos os trechos

A fim de verificar a influência do carregamento nos valores de deflexões, realizaram-se ensaios com cargas mais elevadas nos últimos levantamentos defletométricos, nos quais além da carga padrão de 600kPa foram avaliadas as deflexões com aplicação de cargas de 800kPa.

As análises estatísticas das bacias defletométricas estão apresentadas a seguir na Figura 119 em forma de gráfico do tipo *Boxplot* para avaliar a distribuição empírica dos dados. Uma maior variabilidade dos dados é observada para as medidas mais próximas da aplicação da carga (deflexão máxima). Além de medidas maiores de deflexão com o aumento da carga aplicada, conforme esperado, observou-se uma maior variabilidade dos dados com o aumento da carga.

Com a variação da carga aplicada de 600kPa para 800kPa observou-se um aumento de aproximadamente 27% das deflexões no pavimento, em relação aos valores médios de deflexão máxima. A variabilidade dos dados e as diferenças podem ser observadas nos gráficos a seguir.

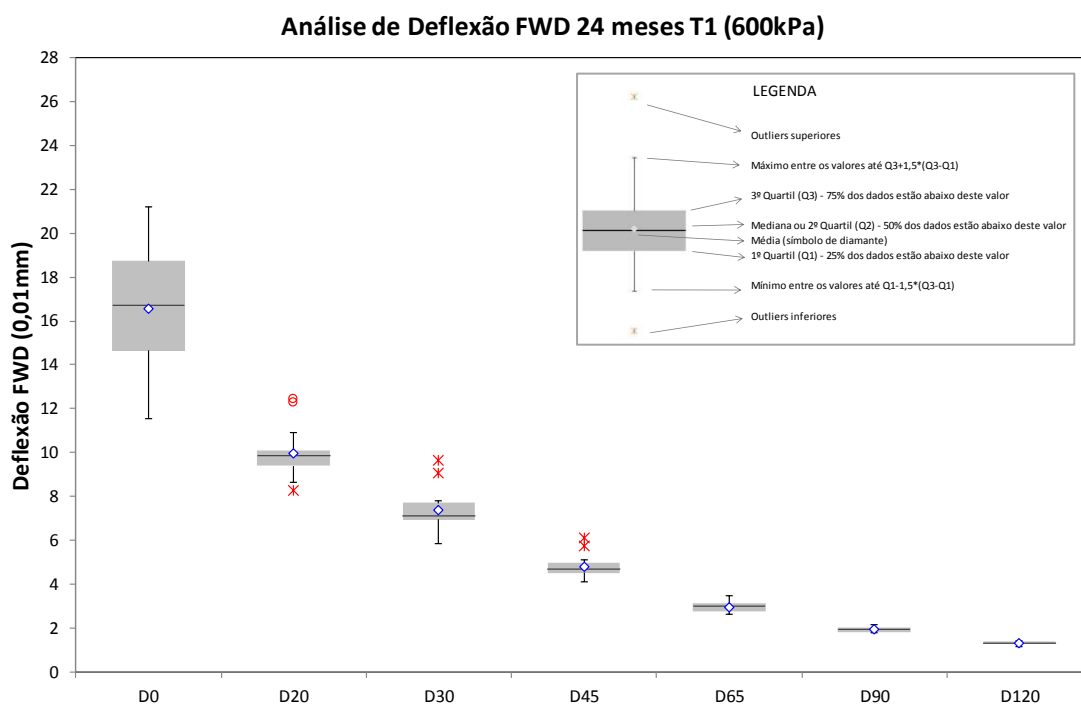


Figura 119 – Análises de deflexões e bacia de deflexão no Trecho 1 em função da carga aplicada (600kPa e 800kPa) após 24 meses de operação da rodovia

5.2.6 *Levantamento visual de defeitos nos trechos monitorados (LV)*

Neste item serão apresentados os defeitos observados após os primeiros 24 meses de abertura da rodovia ao tráfego. A identificação das patologias superficiais incluiu a medição dos afundamentos na trilha de roda e um levantamento visual, para a observação de outros possíveis defeitos existentes no pavimento, ambos normatizados em DNIT 007/2003 – PRO (DNIT,2003c).

- **Levantamento do perfil transversal dos trechos - AMAC®**

Adicionalmente, no último levantamento foi realizada a determinação do perfil transversal da via com equipamento de última geração por meio de um sistema de sensores laser: o **AMAC®**.

Esse sistema gera um plano de laser que intercepta o perfil do pavimento numa largura de 4metros de faixa, num total de 1280 pontos por seção. Por meio de algoritmos para tratamento das imagens da intercepção dos planos, captadas pelo laser, é possível localizar e quantificar com precisão os deslocamentos sofridos pelo laser a cada deformada.

Segundo a empresa que executou o ensaio, é um dos métodos mais precisos de levantamento de alto rendimento disponíveis, hoje, a nível mundial. O perfil transversal permite o levantamento de diversas grandezas, essas apresentadas de acordo com sua distância, referenciada ao primeiro marco da rodovia.

A primeira é a flecha (ou ATR), que é obtida através do programa de processamento do equipamento, que simula uma régua de 1,20 metros de comprimento e calcula a distância entre o perfil medido e a régua. Com essa mesma régua, é possível medir a largura da trilha de roda. A identificação de dois pontos de intersecção do perfil com a régua permite observar uma distância, sendo essa a largura da trilha de roda.

A trilha de roda pode reter certo volume de água, por isso, o programa também gera o plano horizontal que intercepta o perfil do pavimento, simula a lâmina de água e por fim calcula sua altura, levando em consideração a flecha e a declividade existente. Nos três casos, o cálculo é feito tanto para a trilha de roda interna (TRI) quanto para a trilha de roda externa (TRE).

A seguir, na Figura 120 são apresentados de forma ilustrativa os dados levantados na determinação do perfil transversal dos trechos. Na Tabela 34 são apresentados os resultados obtidos para ambos os trechos monitorados da rodovia BR-448/RS, após os dois primeiros anos de abertura da rodovia ao tráfego.

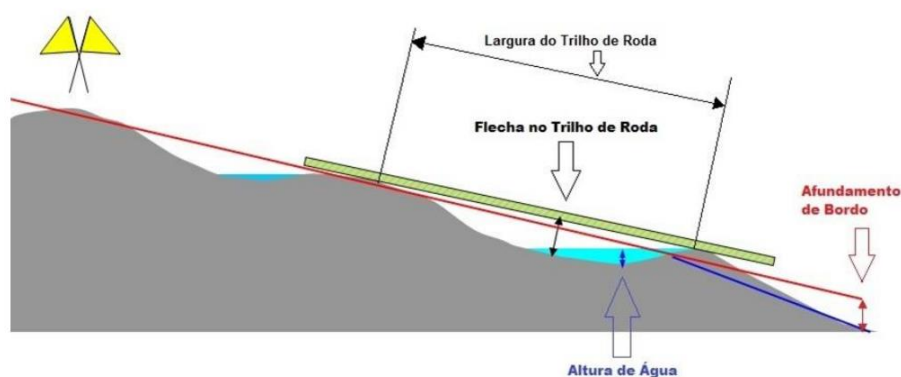


Figura 120 – Levantamento do perfil transversal com o equipamento AMAC, mostrando o afundamento (ou flecha) e a altura da lâmina de água

Tabela 34 - Dados de perfis transversais dos trechos monitorados na BR-448/RS

Distância	ATR		LARGURA DA TRILHA DE RODA		ALTURA DE ÁGUA		Distância	ATR		LARGURA DA TRILHA DE RODA		ALTURA DE ÁGUA	
	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)	TRI (mm)		km	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)
15.600	3.3	3.8	895.6	1,219.3	0.1	1.0	16.760	5.1	4.4	1,227.8	1,247.2	0.2	0.7
15.610	2.1	3.3	774.5	1,082.1	0.0	0.6	16.770	6.5	4.2	1,192.3	1,228.0	0.0	0.9
15.620	4.0	2.4	1,163.5	1,245.0	0.6	0.9	16.780	5.1	3.6	1,180.2	1,246.9	0.2	0.2
15.630	5.1	2.8	1,227.7	1,122.2	0.1	0.5	16.790	3.2	3.0	1,067.3	910.0	1.2	0.0
15.640	7.9	3.1	1,250.0	1,125.2	0.6	0.8	16.800	6.6	3.5	1,171.0	559.5	0.2	2.1
15.650	5.3	3.4	1,182.6	1,138.8	0.0	0.6	16.810	3.4	3.6	1,098.4	1,045.3	0.2	1.4
15.660	4.0	2.7	1,186.3	1,229.4	2.3	1.3	16.820	5.3	4.5	1,203.8	1,198.0	0.6	0.6
15.670	6.1	3.0	756.5	1,227.0	0.3	0.8	16.830	4.9	3.1	1,202.3	801.3	0.1	1.2
15.680	4.0	2.9	637.7	1,235.8	0.0	1.9	16.840	3.8	3.2	1,137.9	1,230.5	0.0	1.9
15.690	4.6	2.9	727.0	1,075.9	0.4	0.2	16.850	6.5	4.3	1,116.5	1,137.1	0.1	0.2
15.700	4.1	3.6	590.6	857.5	1.0	0.3	16.860	4.7	3.5	1,248.8	913.8	0.3	1.7
15.710	4.2	4.1	1,247.5	1,240.0	0.0	1.6	16.870	4.3	4.3	1,247.0	1,034.3	0.3	1.0
15.720	4.1	2.8	1,073.9	1,240.7	0.0	0.3	16.880	5.5	2.7	1,085.7	1,135.0	0.4	1.3
15.730	3.2	3.9	1,033.2	1,236.1	0.1	0.2	16.890	3.9	3.3	1,094.7	1,233.4	0.0	0.9
15.740	3.9	2.9	1,195.1	1,245.6	0.2	0.1	16.900	4.6	2.3	1,146.4	1,237.8	0.2	0.9
15.750	4.4	3.9	1,191.4	1,184.9	0.3	0.6	16.910	5.8	3.4	1,150.8	1,196.2	0.5	1.0
15.760	4.4	3.1	1,213.4	1,122.2	0.0	0.6	16.920	3.7	3.4	1,187.5	756.4	0.5	0.1
15.770	6.7	4.0	1,247.3	899.9	0.0	0.0	16.930	5.3	4.0	1,043.7	547.3	0.2	0.3
15.780	4.6	4.2	1,246.6	1,240.8	0.4	0.3	16.940	3.8	3.2	851.6	1,119.8	0.6	0.9
15.790	4.8	4.0	1,233.2	1,224.8	0.3	0.7	16.950	4.2	2.7	1,211.8	867.9	0.3	0.6
15.800	4.1	3.5	1,249.1	1,249.9	0.2	0.6	16.960	3.4	3.1	1,222.3	1,228.1	0.3	0.5
15.810	3.3	2.1	1,240.6	1,080.4	0.1	1.0	16.970	5.7	3.9	1,189.5	659.2	0.0	1.1
15.820	3.2	2.5	1,167.5	1,224.5	0.1	0.4	16.980	5.2	2.4	1,139.1	704.4	0.0	1.2
15.830	6.8	3.5	1,244.7	726.8	0.1	0.4	16.990	4.8	4.0	1,224.3	1,084.6	0.0	1.1
15.840	4.5	3.4	1,207.9	1,142.2	0.5	0.7	17.000	5.6	3.9	1,060.7	1,098.5	0.3	1.2
15.850	6.2	4.1	1,162.6	1,189.1	0.4	0.0	17.010	4.0	4.3	1,178.5	760.7	0.0	1.0
15.860	7.6	3.2	1,243.3	1,245.8	2.1	0.2	17.020	4.1	4.5	1,109.0	823.9	0.0	0.3
15.870	8.3	4.5	1,215.1	1,248.2	0.3	0.1	17.030	3.9	4.8	1,210.0	1,079.7	0.3	0.0
15.880	9.2	11.0	1,182.3	1,238.0	0.5	2.1	17.040	4.4	4.4	1,246.3	851.7	0.0	0.5
15.890	10.0	5.7	1,248.5	1,171.1	0.3	0.5	17.050	5.1	4.7	1,165.7	1,217.6	0.2	1.0
15.900	4.4	3.8	1,207.3	1,249.3	0.4	0.7	17.060	4.0	3.8	1,246.7	1,043.0	0.1	1.2

Simulada pelo sistema de aquisição de dados, a altura da lâmina de água nas trilhas de roda é apresentada na Figura 121 a seguir para as trilhas internas e externas em ambos os trechos.



Figura 121 – Altura da lâmina de água nas trilhas de roda Trecho 1 e Trecho 2 BR-448/RS

A altura da lâmina d'água em pavimentos rodoviários é um fator que merece atenção especial, assim como em pavimentos aeroportuários, a formação de lâmina d'água potencializa a hidroplanagem, pois quando maior a profundidade do fluido (acima da macrotextura) maiores serão as forças inerciais que irão agir sobre o pneu e influenciando o contato pneu-pavimento.

A *Internacional Civil Aviation Organization* – ICAO (2002) afirma que é necessária a manutenção dos pavimentos quando a lâmina d'água é superior a 3mm. Entretanto, a lâmina d'água vai depender de diversos fatores, como a declividade da pista, a macrotextura do revestimento, a intensidade da chuva, dentre outros. No caso de pavimentos rodoviários, a formação de ATR irá intensificar o acúmulo de água na superfície do pavimento, ou seja, a formação de lâminas de água nas trilhas.

Em ambos os trechos monitorados na BR-448/RS, as alturas de lâmina de água nas trilhas de roda chegam a valores máximos de 2,5mm. No caso do Trecho 1, os maiores valores foram observados em pontos isolados distribuídos entre as duas trilhas, já para o Trecho 2 os maiores valores foram observados exclusivamente na trilha externa. Levando em consideração o limite de 3,0mm de lâmina de água, ambos os trechos estão alcançando limites críticos quanto ao potencial de hidroplanagem, somado à expressiva perda de macro e microtextura do revestimento apresentada anteriormente.

- **Levantamento dos defeitos para cálculo do IGG com emprego do AMAC®**

Na avaliação dos defeitos nos trechos, através da determinação do Índice de Gravidade Global (IGG), foi empregado o equipamento de medição AMAC® cujo sistema de avaliação da superfície do pavimento é composto por dois sensores. O primeiro sensor faz a aquisição da imagem do lado direito da faixa, enquanto o outro capta no mesmo local, porém do lado esquerdo. Desta forma, cada sensor adquire uma imagem de meia faixa e a seguir as imagens são justapostas para formar uma imagem final do estado do pavimento na faixa de tráfego em análise. A Figura 122 ilustra o funcionamento dos sensores.



Figura 122 – Ilustração do equipamento AMAC e do funcionamento dos sensores laser

Para a identificação e interpretação das degradações utilizaram-se os padrões estabelecidos pelo DNIT (DNIT 005/2003 - TER). A partir do levantamento contínuo dos defeitos do pavimento, foi calculado do Índice de Gravidade Global (IGG) nos dois trechos.

Para esse cálculo, o referenciamento dos defeitos foi feito em estacas espaçadas de 20 metros, na faixa externa. Após esta etapa os defeitos foram computados conforme os procedimentos recomendados pelo DNIT. A Tabela 35 apresenta os resultados do Índice de Gravidade Global (IGG) dos trechos, que classificam o pavimento como estando na “ótima”, sem a ocorrência de defeitos além dos afundamentos nas trilhas de rodas (ATRs).

Tabela 35 - Resultados de IGG dos trechos monitorados na BR-448/RS

Trecho	km i	km f	Ext (m)	ATR	IGG
1	15+600	15+900	300	4,20	9,20
2	16+760	17+070	300	4,10	6,10

Os valores médios de ATRs obtidos através deste levantamento e considerados para a definição do IGG são um pouco inferiores aos medidos com a treliça, o que se deve ao equipamento empregado e à metodologia de levantamento. Não obstante, os ATRs nos dois trechos são praticamente idênticos, como quando medidos com a treliça.

Mesmo apresentando valores muito semelhantes para ambos os trechos, os valores de ATRs (único defeito contabilizado para determinação do IGG), levaram a valores distintos do índice de gravidade global (Trecho 1: 9,20 e Trecho 2: 6,10). Esta variação se deve às diferentes médias aritméticas das variâncias das flechas em ambas as trilhas analisadas, parâmetro este levado em consideração para determinação do IGG, ou seja, há um maior desvio padrão dos valores medidos no Trecho 1 em comparação com o Trecho 2.

- **Levantamento visual**

Através de uma análise visual da superfície de rolamento foram levantados outros defeitos superficiais no revestimento, sendo encontrados pontos com Exsudação (EX), Desgaste da superfície do revestimento (D), e Segregação da massa asfáltica (SGMA), sendo este último um problema de execução observado com bastante frequência nos trechos, conforme já mencionado anteriormente. A ocorrência destes defeitos está apresentada na Tabela 36

Em ambos os trechos, nos pontos onde ocorreu segregação da mistura asfáltica se mediram os maiores valores de macrot textura, como já era esperado. Os defeitos acima listados estão em fase inicial, não oferecendo risco ao tráfego.

Tabela 36 – Defeitos superficiais observados no Trecho 1 e Trecho 2

PONTO	ESTACA	Defeitos Superficiais Observados	PONTO	ESTACA	Defeitos Superficiais Observados
1	15+600	D	1	16+760	EX - D
2	15+620	EX	2	16+780	EX - D
3	15+640	EX - SGMA	3	16+800	SGMA - D
4	15+660	D	4	16+820	SGMA - D
5	15+680	D	5	16+840	SGMA
6	15+700	SGMA - D	6	16+860	SGMA
7	15+720	SGMA - D	7	16+880	EX
8	15+740	SGMA - D	8	16+900	D
9	15+760	EX - SGMA - D	9	16+920	SGMA
10	15+780	EX - D	10	16+940	D
11	15+800	EX	11	16+960	EX - D
12	15+820	SGMA	12	16+980	SGMA - D
13	15+840	D	13	17+000	SGMA
14	15+860	D	14	17+020	D
15	15+880	EX - SGMA - D	15	17+040	EX
16	15+900	EX - D	16	17+060	EX

5.3 Simulação de Desempenho Considerando Distintos Cenários de Espectros de Cargas - Tráfego Ideal e Real Tráfego Circulante na Rodovia BR-290/RS

Neste item serão apresentadas algumas análises de desempenho realizadas, considerando os reais espectros de carga determinados no monitoramento de tráfego realizado na BR-290/RS com a implantação e operacionalização do Sistema de Pesagem em Movimento de Alta Velocidade (WIM– Weight-in-Motion).

O período de monitoramento considerado para determinação dos parâmetros de tráfego na simulação de desempenho dos distintos cenários de cargas definidos foi ano de 2014, registrando-se, ao longo de 12 meses, um total de 4.180.425 veículos monitorados, sendo 874.918 veículos comerciais.

A seguir serão apresentadas brevemente as etapas para determinação dos parâmetros de tráfego a serem empregados nas simulações de desempenho com o software da AASHTO (AASHTOWare Pavement ME Design).

A fim de avaliar o impacto causado pelo excesso de carga, serão considerados dois cenários: a) um no qual se utilizam considerações normais de cargas dos eixos (carga máxima legal), que é geralmente empregado quando não se dispõe de dados de carregamento do tráfego disponíveis; e b) outro em que se consideram os reais carregamentos praticados.

5.3.1 Modelagem de Previsão de Desempenho dos Cenários Definidos

Avaliar as respostas do pavimento frente às cargas que o solicitam é de fundamental importância para compreensão do seu desempenho futuro. Isto afeta diretamente a maneira como o pavimento é dimensionado e também seus planos de manutenção.

Serão apresentados na sequência os resultados da Modelagem da Previsão de Desempenho em função dos cenários constituídos a partir dos dados coletados do sistema WIM. Através desta modelagem pretende-se quantificar o impacto do espectro de cargas rodantes no desempenho do pavimento da BR-290/RS, no que se refere a seus parâmetros estruturais e funcionais; uma vez que o equipamento de pesagem em movimento registra e pesa, com elevada acurácia, os veículos de carga que trafegaram naquele trecho.

As análises são realizadas avaliando o desempenho da estrutura através da evolução da irregularidade, do trincamento e do afundamento de trilha de roda em distintos cenários de

cargas. As definições destes cenários são apresentadas resumidamente na Tabela 37 e definidos com maiores detalhes anteriormente na Metodologia (item 3.4 Identificação e Simulação de Distintos Cenários de Espectros de Carga).

Tabela 37 - Cenários de cargas analisados

Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV
Tráfego Ideal	Tráfego Ideal + % T	Tráfego Real	Tráfego Real + % EX

%T: Percentual de tolerância; %EX: Percentual de excesso de cargas

5.3.2 Resultados das Simulações dos Cenários

A partir dos distintos cenários com espectros de carga, definidos no capítulo de Metodologia, procedeu-se à realização das análises de previsão de desempenho, com o intuito de verificar qual o impacto causado na estrutura do pavimento, considerando-se parâmetros funcionais e estruturais. Conforme enunciado na metodologia (item 3.4) as análises de desempenho foram realizadas com o software AASHTOWare (Figura 123 e Figura 58).



Figura 123 – Tela do AASHTOWare (empregado para análise e previsão de desempenho)

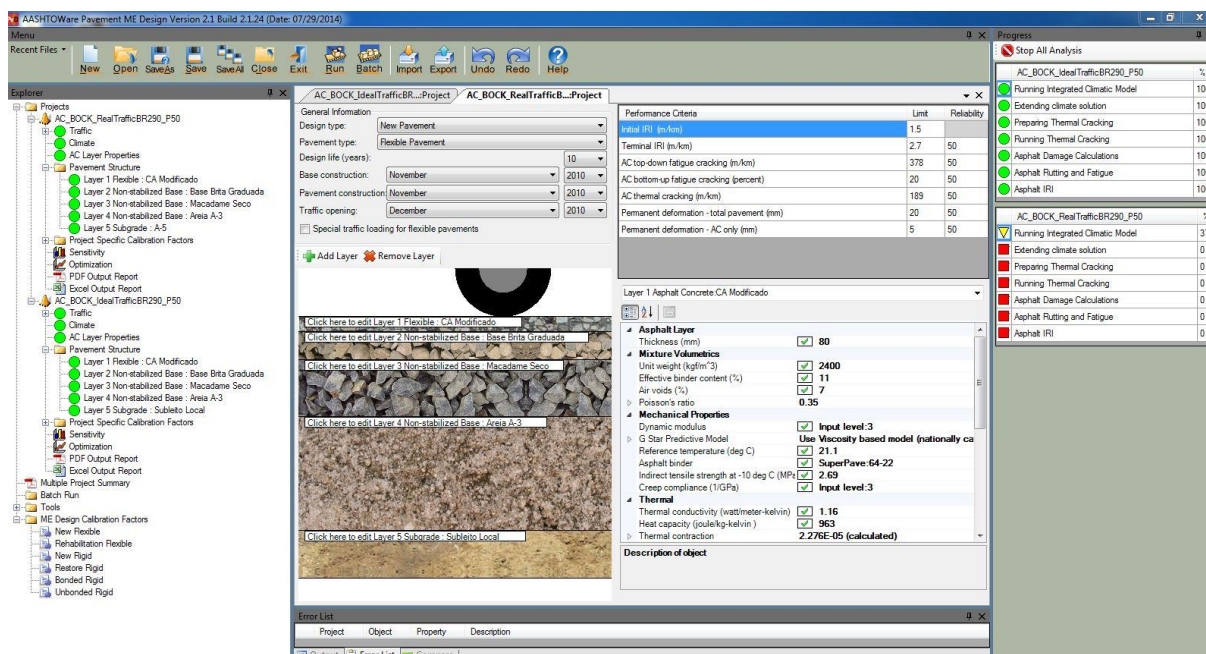


Figura 124 – Tela do software AASHTOWare Pavement ME Design com estrutura do pavimento e condições gerais de análise de desempenho para os distintos cenários de espectros de cargas

Para as condições gerais de análise foram considerados os seguintes parâmetros: limites de área trincada igual a 20%; IRI inicial de 1,5m/km e limite de IRI de 2,7m/km; e limite de 5,0 mm de deformação permanente do revestimento asfáltico.

Após a definição dos parâmetros de entrada requeridos pelo software iniciou-se a análise dos resultados de desempenho gerados em função dos cenários de espectro de cargas estabelecidos. Os resultados são apresentados a seguir de forma comparativa e agrupados em função do tipo de dano avaliado.

Juntamente com os resultados da previsão de desempenho, são apresentados os resultados obtidos através dos monitoramentos de campo realizados no decorrer da pesquisa.

Considerou-se, para avaliação do desempenho do pavimento da BR-290/RS, a estrutura composta por uma camada concreto asfáltico com ligante asfáltico modificado com polímero (8,0 cm de CA), uma base não estabilizada (granular) de 15,0 cm de espessura, uma sub-base de 30,0cm de macadame seco sobre um reforço de areia de 60,0 cm, assente sobre um solo do tipo A-5, conforme representação na Figura 125.

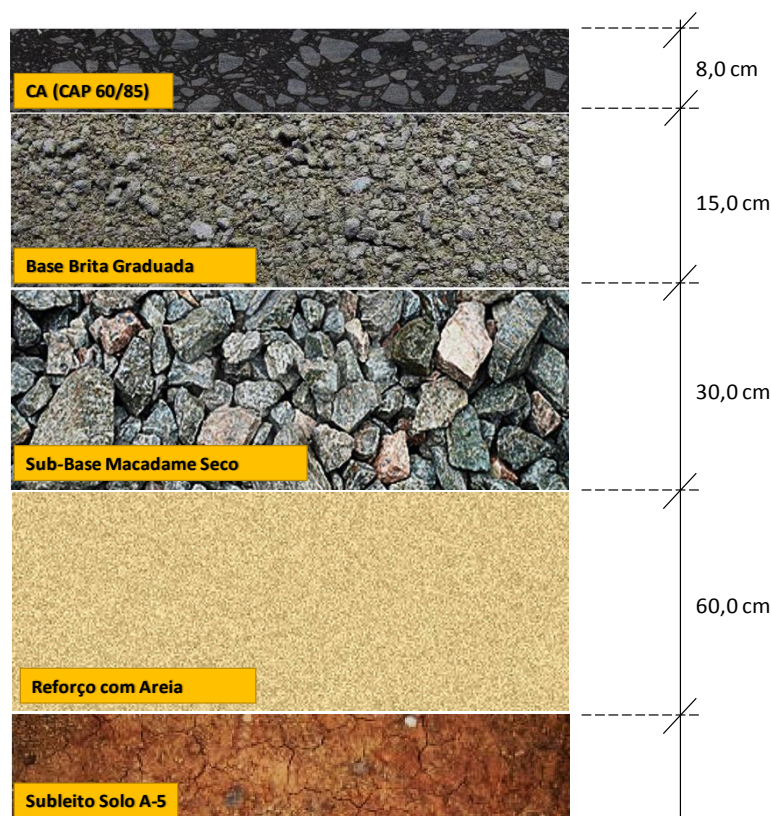


Figura 125: Estrutura do pavimento da BR-290/RS considerada para realização das análises de desempenho para os distintos cenários de espectro de cargas

5.3.3 Modelagem das Curvas de Previsão de Desempenho

A seguir é apresentado um resumo dos resultados de previsão de desempenho obtidos para os diferentes cenários analisados, ou seja, considerando um tráfego ideal sem sobrecargas (Ideal), tráfego Ideal acrescido do limite de “tolerância” de 10% nos eixos (Ideal +%T), tráfego real observado na rodovia (Real) e uma consideração superior de excesso de cargas de 20% nos eixos (Real +%EX). Os resultados apresentados foram obtidos considerando um nível de confiabilidade de 50% na previsão de desempenho do software.

A Figura 126 apresenta um resumo das análises de desempenho realizadas. Pode-se observar que os critérios de projeto definidos somente não são satisfatórios para a deformação permanente da camada de revestimento asfáltico (tráfego ideal e com a “tolerância”) e para a deformação permanente total do pavimento (tráfego real e consideração de excesso de 20%).

Nos demais parâmetros observa-se uma variação significativa frente à mudança do cenário de cargas, porém todos dentro dos limites impostos para um período de projeto de 10 anos. Estas

variações são apresentadas de forma detalhada a seguir, observando sua evolução com o passar da vida útil do pavimento. Posteriormente realizar-se-á um comparativo dos dados considerando um aumento no nível de confiabilidade adotado (95%).

Distress Prediction Summary					
Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied ?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
AC_BOCK_IdealTrafficBR290_P50					
Terminal IRI (m/km)	2.70	2.11	50.00	84.86	Pass
Permanent deformation - total pavement (mm)	20.00	16.86	50.00	84.05	Pass
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	20.00	9.17	50.00	87.06	Pass
AC thermal cracking (m/km)	189.00	0.19	50.00	100.00	Pass
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.00	113.83	50.00	74.79	Pass
Permanent deformation - AC only (mm)	5.00	8.87	50.00	7.20	Fail
AC_BOCK_RealTrafficBR290_P50					
Terminal IRI (m/km)	2.70	2.22	50.00	79.23	Pass
Permanent deformation - total pavement (mm)	20.00	21.36	50.00	34.73	Fail
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	20.00	9.47	50.00	87.30	Pass
AC thermal cracking (m/km)	189.00	0.19	50.00	100.00	Pass
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.00	83.90	50.00	77.93	Pass
Permanent deformation - AC only (mm)	5.00	9.30	50.00	5.88	Fail
AC_BOCK_IdealTrafficBR290_P50_T					
Terminal IRI (m/km)	2.70	2.12	50.00	84.12	Pass
Permanent deformation - total pavement (mm)	20.00	17.31	50.00	79.95	Pass
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	20.00	10.4	50.00	86.30	Pass
AC thermal cracking (m/km)	189.00	0.19	50.00	100.00	Pass
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.00	128.98	50.00	73.29	Pass
Permanent deformation - AC only (mm)	5.00	8.95	50.00	6.94	Fail
AC_BOCK_RealTrafficBR290_P50_EX					
Terminal IRI (m/km)	2.70	2.31	50.00	73.89	Pass
Permanent deformation - total pavement (mm)	20.00	23.76	50.00	16.52	Fail
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	20.00	16.7	50.00	79.68	Pass
AC thermal cracking (m/km)	189.00	0.19	50.00	100.00	Pass
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.00	195.08	50.00	67.00	Pass
Permanent deformation - AC only (mm)	5.00	11.15	50.00	2.64	Fail

Figura 126 – AASHTOWare Pavement ME Design: Resultados das análises de desempenho

➤ *Curvas de previsão de desempenho de Irregularidade Longitudinal*

A evolução da Irregularidade Longitudinal (IRI) durante o período de projeto de 10 anos, conforme análise realizada, está apresentada na Figura 127. O valor inicial de irregularidade longitudinal considerado foi de 1,5m/km.

A variação obtida na simulação realizada para o cenário Ideal de carregamento e para o cenário representando o Real carregamento da frota de veículos de carga da BR-290/RS foi da ordem de + 5,2%.

A variação em relação ao limite de “tolerância” foi relativamente baixa (0,5%), porém ao considerar uma sobrecarga mais significativa (20%), o aumento no valor previsto de IRI foi de um aumento de praticamente 10% conforme dados apresentados na Figura 128.

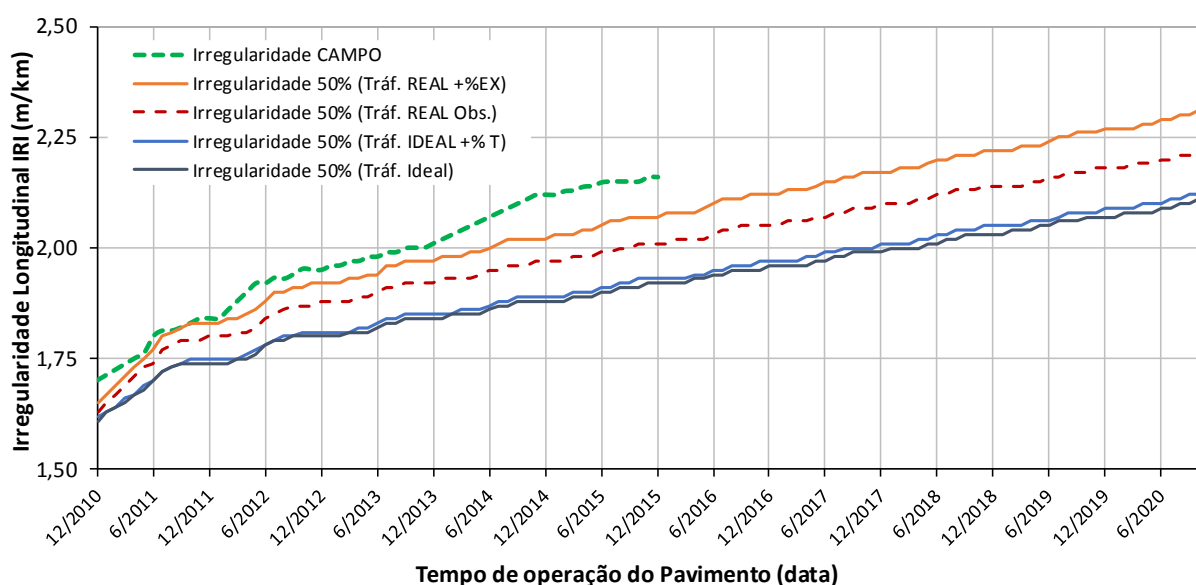


Figura 127 – Comparativo entre previsões de desempenho para evolução da irregularidade longitudinal considerando distintos cenários de carga e valores observados em campo

Frente aos cenários analisados, a evolução da irregularidade longitudinal observada em campo encontra-se muito próxima ao pior cenário analisado. Após 4 anos de monitoramento do trecho o valor médio observado é da ordem de 2,15m/km.

Existem variações entre os valores obtidos na modelagem de desempenho do pavimento quanto à sua irregularidade longitudinal para os distintos cenários apresentados, porém esta variação não é muito significativa, sendo da ordem de 0,20m/km no período de projeto (10 anos).

Porém, cabe ressaltar que a variação de IRI é um fator importante pois seu aumento acaba por intensificar os demais mecanismos de degradação, principalmente as deformações permanentes e o trincamentos da camada asfáltica, em função do aumento da ação dinâmica dos veículos de carga sobre o pavimento.

Os valores finais de previsão de IRI para cada um dos cenários analisados são apresentados a seguir na Figura 128, adicionalmente são apresentadas as variações percentuais observadas entre os cenários.

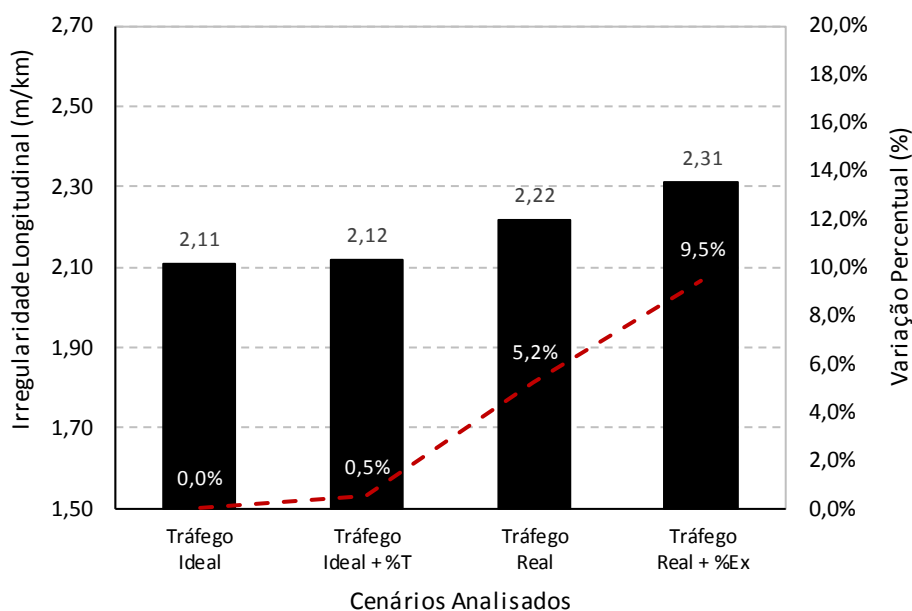


Figura 128 – Irregularidade longitudinal para os distintos cenários de espectro de cargas analisados e variação percentual observada

➤ *Curvas de previsão de desempenho de Deformação Permanente*

As previsões dos resultados de deformação permanente da estrutura analisada mostram uma significativa diferença quando se consideram os cenários Ideal (sem sobrecargas) e Real de cargas (considerando as sobrecargas detectadas pelo monitoramento WIM).

A Figura 129 apresenta um exemplo de previsão de desempenho quanto aos níveis de deformação das principais camadas do pavimento e a deformação total da estrutura. Estes níveis de deformação são previstos pelo software nas análises realizadas para as distintas configurações de tráfego consideradas, desde o tráfego ideal até a consideração de níveis mais elevados de carga (além do tráfego real definido).

É importante destacar que as deformações permanentes medidas em campo contemplam todas as camadas do pavimento e o subleito, enquanto que nas previsões do software foram consideradas apenas as deformações na camada asfáltica. De fato, os modelos da AASHTO para deformação permanente são muito conservadores (superestimam as deformações), razão pela qual não são empregados em alguns estados, como o Texas por exemplo.

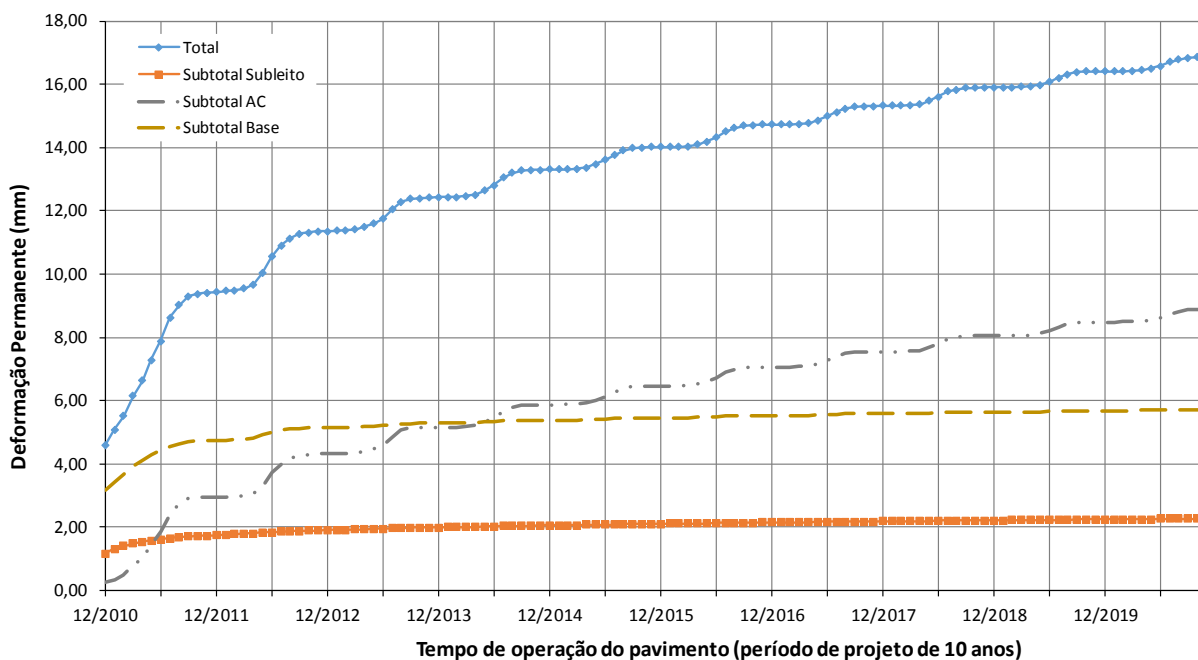


Figura 129 – Exemplo de previsão da evolução de deformação permanente nas camadas do pavimento analisado (cenário Ideal de tráfego considerado)

Para a análise do impacto das sobrecargas no desempenho do pavimento foram realizadas estimativas da deformação permanente (Figura 130) e relacionadas às deformações totais do pavimento, previstas através das análises realizadas com auxílio do software da AASHTO.

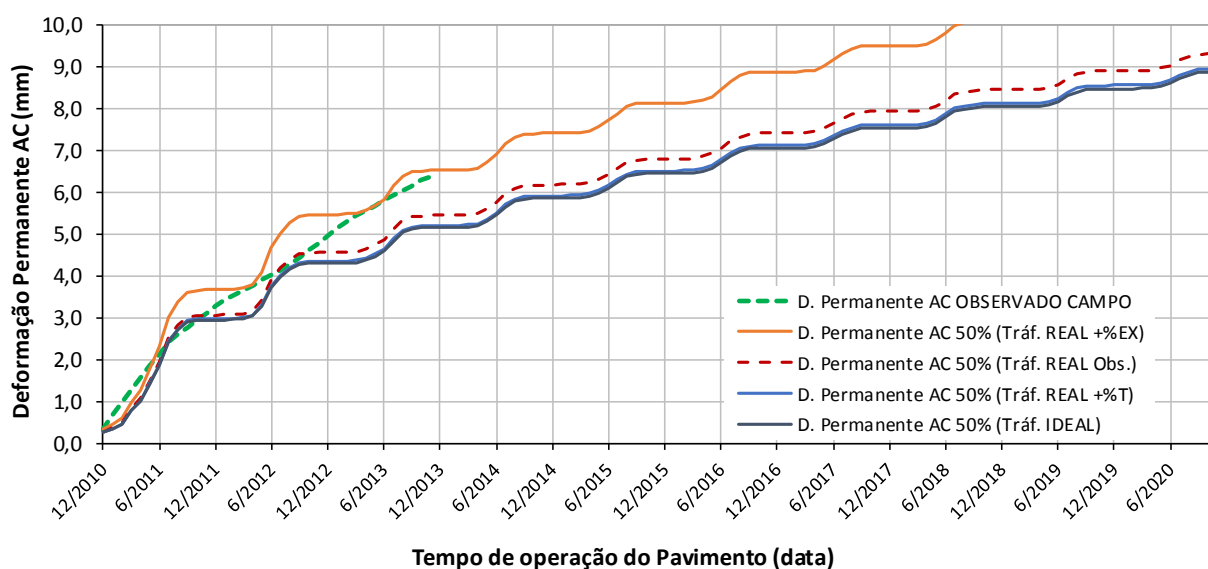


Figura 130 – Comparativo entre previsões de evolução de deformação permanente na camada asfáltica ao longo do período de análise (10 anos) considerando distintos cenários de carga e valores de deformação total observados em campo

Na Figura 131 é apresentado um detalhe do gráfico anterior, considerando-se apenas o período de monitoramento do pavimento (incluindo a etapa de pós-restauração - intervenção). A evolução de campo está muito próxima das previsões de desempenho obtidas, os valores finais são semelhantes aos níveis considerados com uma expressiva sobrecarga no tráfego solicitante da estrutura do pavimento.

Entretanto, vale lembrar que as medidas de afundamentos de campo possuem a contribuição das demais camadas, conforme mencionado anteriormente, e as medias de previsão aqui apresentadas correspondem somente à camada de revestimento asfáltico.

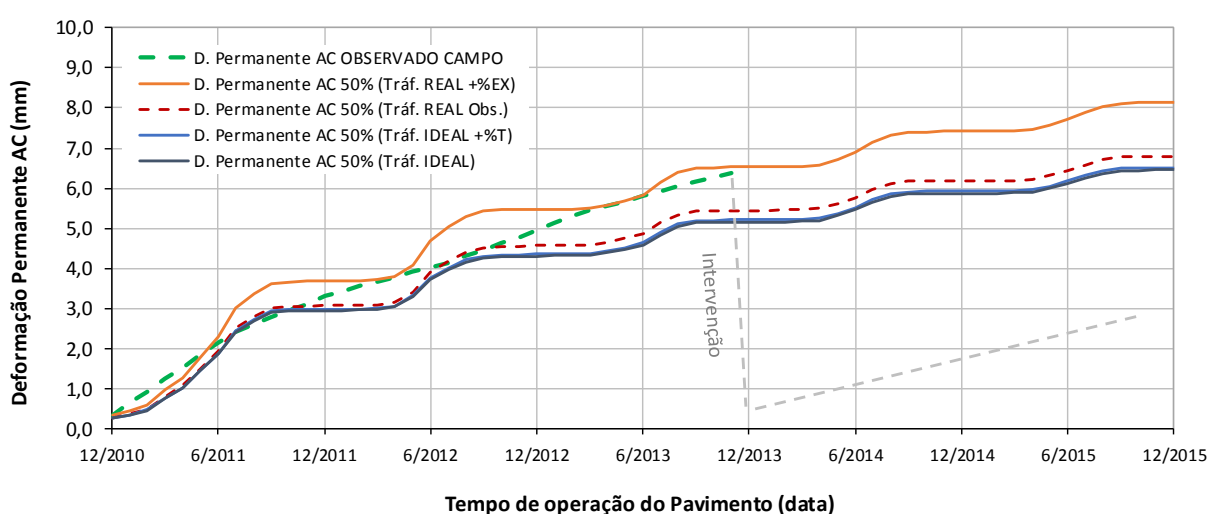


Figura 131 – Detalhe do comparativo entre previsões de evolução de deformação permanente na camada asfáltica com vários cenários de carga para e valores observados em campo

Ao considerar as variações neste parâmetro, é possível concluir que a deformação total do pavimento é significativamente influenciada pelo espectro de carga. Observa-se um aumento de aproximadamente 5% das deformações permanentes no revestimento asfáltico ao substituir-se o tráfego Ideal pelo Real. Já para a mesma situação, considerando a deformação total do pavimento, o aumento é da ordem de 26% (Figura 50).

As demais variações podem ser observadas nos gráficos da Figura 132 e Figura 133, com destaque para um aumento da ordem de 1,0% a 2,7% na consideração dos limites de tolerância nos eixos. Com o aumento do nível de excesso de carga praticado tem-se um aumento bastante expressivo nos níveis de deformação do pavimento (40,9%) e do revestimento asfáltico (25,7%).

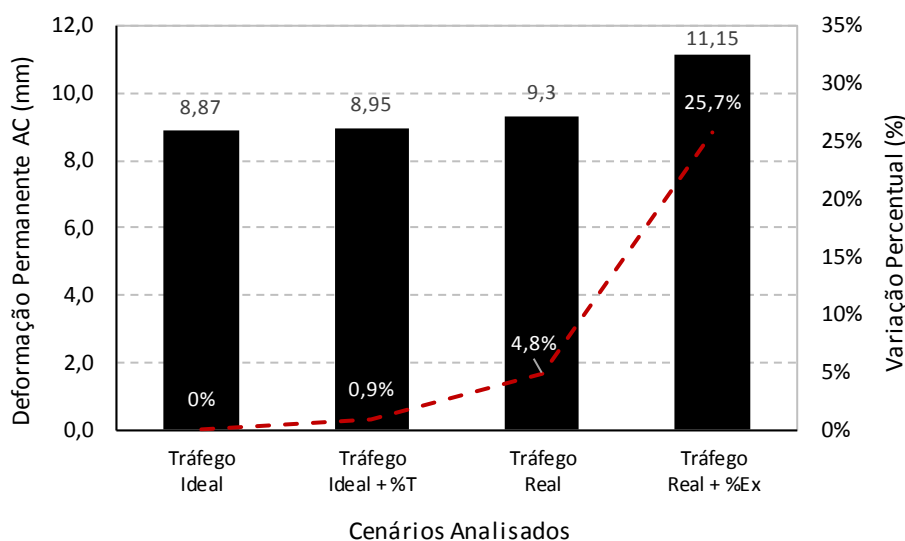


Figura 132 – Deformação permanente na camada asfáltica para os distintos cenários de espectro de cargas analisados e variação percentual observada

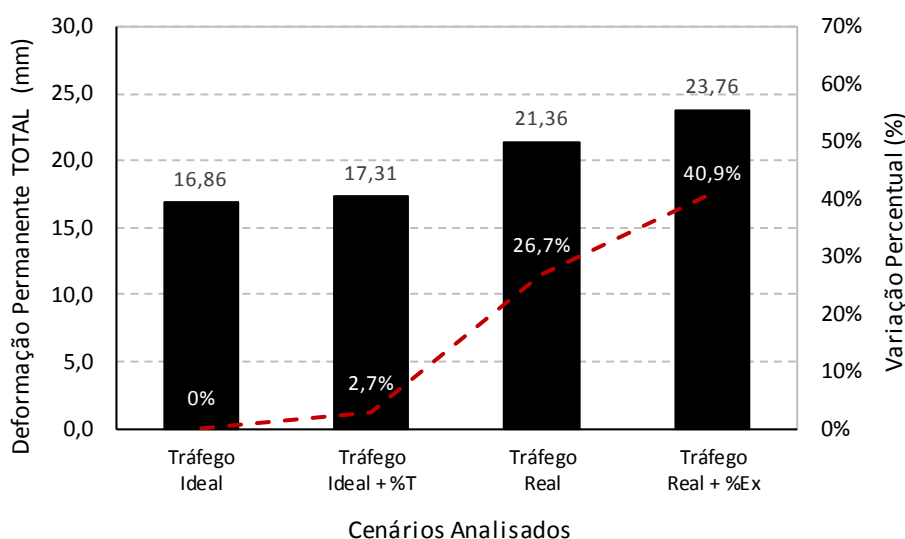


Figura 133 – Deformação permanente total para os distintos cenários de espectro de cargas analisados e variação percentual observada

Diante dos limites assumidos nas análises realizadas com o software da AASHTO para avaliação de deformação permanente da camada asfáltica (5,0 mm) e deformação total do pavimento (20,0 mm). Verifica-se que o limite foi ultrapassado em todos os casos analisados para a deformação do revestimento. Para a deformação total do pavimento, o limite imposto foi somente ultrapassado ao considerar o tráfego real e um aumento na sobrecarga. Vale ressaltar que os modelos de deformação permanente empregados são considerados severos em suas previsões.

➤ *Curvas de previsão de desempenho de Trincamentos por Fadiga*

Para análise de trincamentos, na Figura 134 apresentam-se os resultados das simulações frente aos cenários considerados, resultados esses que são bastante distintos.

Em relação aos resultados de campo, observa-se uma divergência em comparação com os valores simulados, principalmente ao início do trincamento e sua posterior evolução. Nas simulações o acúmulo do dano já ocorre desde os primeiros meses de operação do pavimento, porém, em campo o início do trincamento se dá apenas após 27 meses de operação.

Os valores máximos atingidos em campo, apesar de prejudicados em função da execução de uma camada de microrrevestimento asfáltico no trecho em estudo, ficaram próximos aos valores simulados para o período.

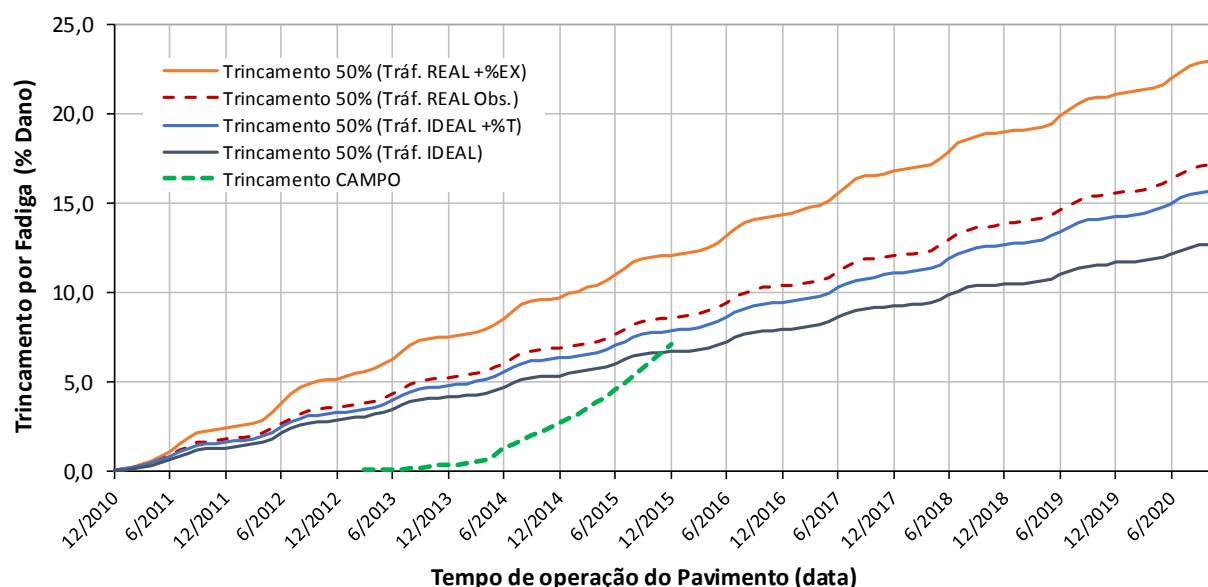


Figura 134 – Comparativo entre previsões de desempenho considerando distintos cenários de carga para evolução de trincamento por fadiga e valores observados em campo

Para os distintos cenários de espectro de cargas analisado, demonstrou-se um aumento significativo do trincamento ao considerar carregamentos mais elevados na frota de veículos comerciais, sendo eles: aumento de mais de 23% ao considerar o limite de “tolerância” nos eixos; aumento de aproximadamente 34% do trincamento considerando os atuais níveis reais de carga; e um aumento de mais de 80% do trincamento ao considerar uma sobrecarga de 20% na frota (Figura 135).

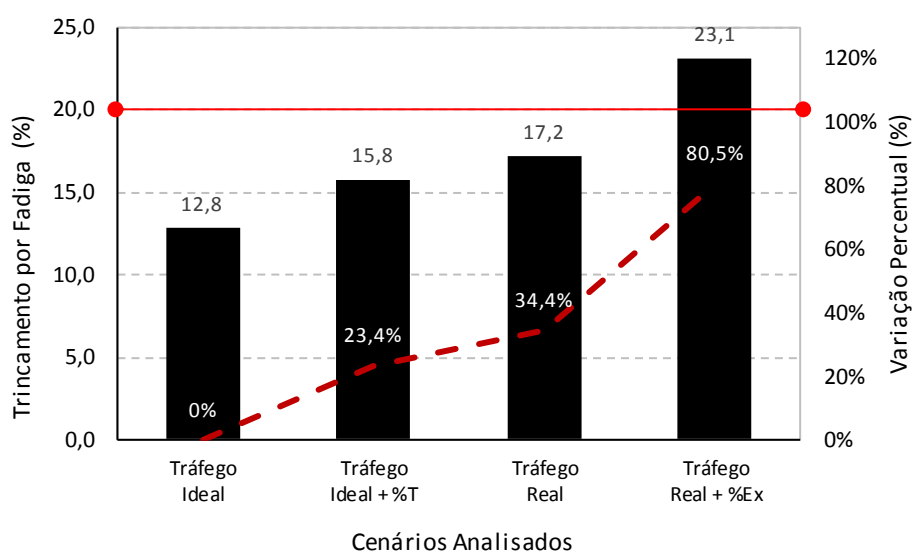


Figura 135 – Trincamento por fadiga para os distintos cenários de espectro de cargas analisados e variação percentual observada

5.3.4 Influência do nível de confiabilidade

A fim de verificar a influência do nível de confiabilidade empregado nas análises de previsão de desempenho, realizaram-se as mesmas análises aumentando a confiabilidade de 50% para 95%. Um comparativo entre a variação dos parâmetros está apresentado de forma resumida na Figura 136.

De forma geral observou-se que ao aumentar o nível de confiabilidade ocorreu, na maioria dos casos, um aumento do valor inicial do parâmetro a ser analisado, porém as taxas de variação durante o período de projeto foram bastante semelhantes.

Conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 136, o percentual de variação do parâmetro em análise, no decorrer dos cenários analisados, foi sendo gradativamente reduzido ao aumentar-se o nível de confiabilidade das análises.

De forma a exemplificar a conclusão acima podemos tomar como exemplo a análise realizada para a irregularidade longitudinal onde a diferença percentual do resultado final no cenário com excesso de cargas “Tráf. +% EX” em relação ao cenário Ideal de carregamento adotado como referência “Tráf. Ideal” passou de +9,5% para +8,5% ao aumentar-se o nível de confiabilidade de 50% para 95%. Esta mesma tendência foi observada para os demais parâmetros analisados.

PARÂMETROS ANALISADOS	Confiabilidade 50%				Confiabilidade 95%			
	Tráfego Ideal	Tráfego Ideal +%T	Tráfego Real	Tráfego Real +%Ex	Tráfego Ideal	Tráfego Ideal +%T	Tráfego Real	Tráfego Real +%Ex
IRI (m/km)	2,11	2,12	2,22	2,31	3,05	3,07	3,19	3,31
Deformação Permanente Total (mm)	16,86	17,31	21,36	23,76	22,03	22,56	27,12	30,13
Trincamento Fadiga (% dano)	12,8	15,8	17,2	23,1	12,8	15,8	17,2	23,1
Trincamento Térmico (m/km)	0,19	0,19	0,19	0,19	6,55	6,55	6,55	6,55
Deformação Permanente AC (mm)	8,87	8,95	9,3	11,15	13,22	13,33	13,82	16,37

VARIAÇÃO % PARÂMETROS	Confiabilidade 50%				Confiabilidade 95%			
	Tráfego Ideal	Tráfego Ideal +%T	Tráfego Real	Tráfego Real +%Ex	Tráfego Ideal	Tráfego Ideal +%T	Tráfego Real	Tráfego Real +%Ex
IRI (m/km)	0,0%	0,5%	5,2%	9,5%	0,0%	0,7%	4,6%	8,5%
Deformação Permanente Total (mm)	0,0%	2,7%	26,7%	40,9%	0%	2,4%	23,1%	36,8%
Trincamento Fadiga (% dano)	0,0%	23,4%	34,4%	80,5%	0%	23,4%	34,4%	80,5%
Trincamento Térmico (m/km)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%
Deformação Permanente AC (mm)	0,0%	0,9%	4,8%	25,7%	0%	0,8%	4,5%	23,8%

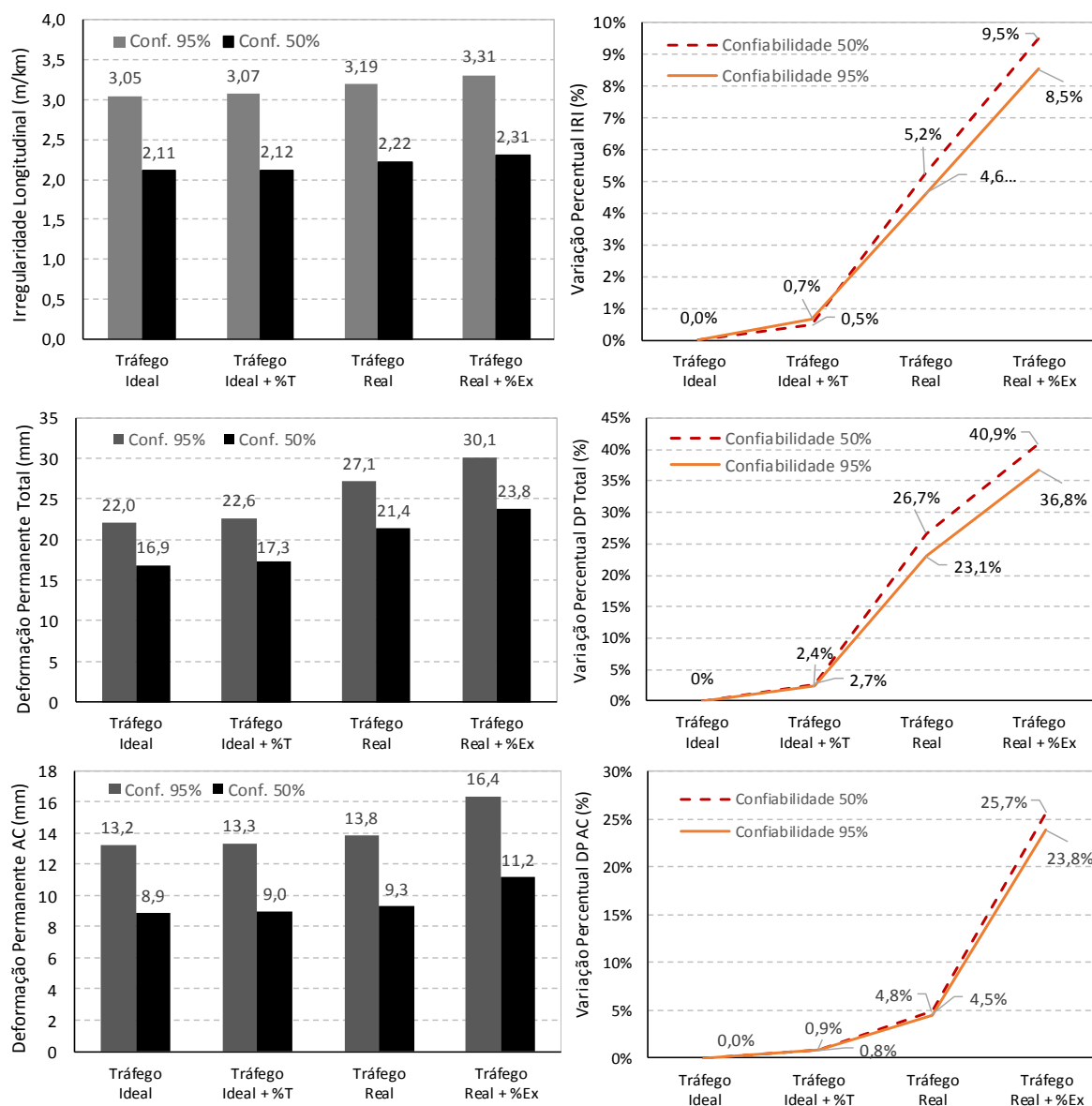


Figura 136 – Influência do nível de confiabilidade das análises realizadas para os distintos cenários de cargas através do AASHTOWare Pavement ME Design

5.3.5 Redução da vida útil em relação aos cenários de cargas analisados

Para verificar qual a influência do tráfego na vida útil do pavimento em análise realizou-se uma estimativa de vida útil em relação a cada um dos parâmetros analisados em função de um limite pré-estabelecido. Estes limites foram determinados de forma a se ter um comparativo da evolução do parâmetro para todos os cenários de cargas propostos com a principal finalidade de analisar a influência das sobrecargas nos parâmetros de desempenho simulados em relação ao tráfego ideal considerado em projeto.

Foram definidos os seguintes limites: Trincamento por fadiga correspondente a 10% de dano ao pavimento (área trincada); Irregularidade longitudinal de 2,0m/km; Deformação permanente total do pavimento correspondente a 15,0mm e deformação permanente no revestimento asfáltico de 5,0mm.

Na Figura 137, os valores apresentados para cada cenário de carga correspondem, em anos, quanto tempo o pavimento em análise levou até chegar ao limite estabelecido para cada parâmetro. O período de projeto considerado nas análises de previsão de desempenho corresponde a 10 anos. Portanto, para cada cenário de cargas, desde o cenário Ideal até os cenários com excesso de cargas são avaliadas as reduções na vida útil em relação a cada um dos parâmetros analisados: Trincamento por fadiga, irregularidade e deformações permanentes.

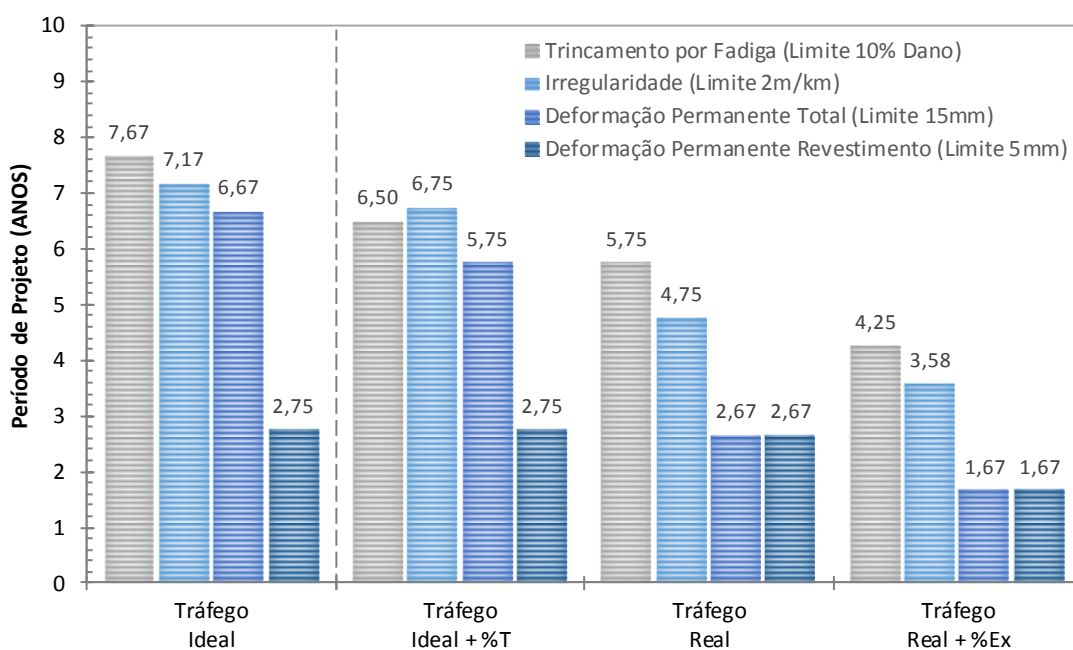


Figura 137 – Vida útil do pavimento quanto aos parâmetros analisados em relação aos diferentes níveis de carregamento simulados

Conforme já mencionado anteriormente, os modelos da AASHTO que avaliam as deformações permanentes são muito conservadores (superestimam as deformações), fato este que acaba determinando este parâmetro com o qual se obteve uma menor estimativa de durabilidade do pavimento analisado para o atingimento do limite estabelecido, tanto para as deformações permanentes na camada de CA quanto na deformação total da estrutura do pavimento.

Os percentuais de redução de vida útil em relação ao cenário Ideal de tráfego são apresentados no gráfico da Figura 138 a seguir, onde são observadas reduções bem consideráveis em se tratando dos reais carregamentos observados na rodovia.

O aumento no trincamento por fadiga considerando o cenário de sobrecargas praticado na rodovia causou uma redução da vida útil da ordem de 25%, praticamente 34% em relação ao limite de irregularidade e 60% em relação ao limite de deformação permanente total.

Avaliando a influência dos limites de “tolerância” de carga nos eixos foram observadas reduções da vida útil do pavimento da ordem de 15% ao considerar o limite estabelecido de trincamento por fadiga do revestimento asfáltico, praticamente 14% em relação à deformação permanente do revestimento asfáltico e 6% quanto ao limite de irregularidade.

Ao considerar um cenário mais severo de sobrecargas estes valores aumentam expressivamente, conforme observado no gráfico.

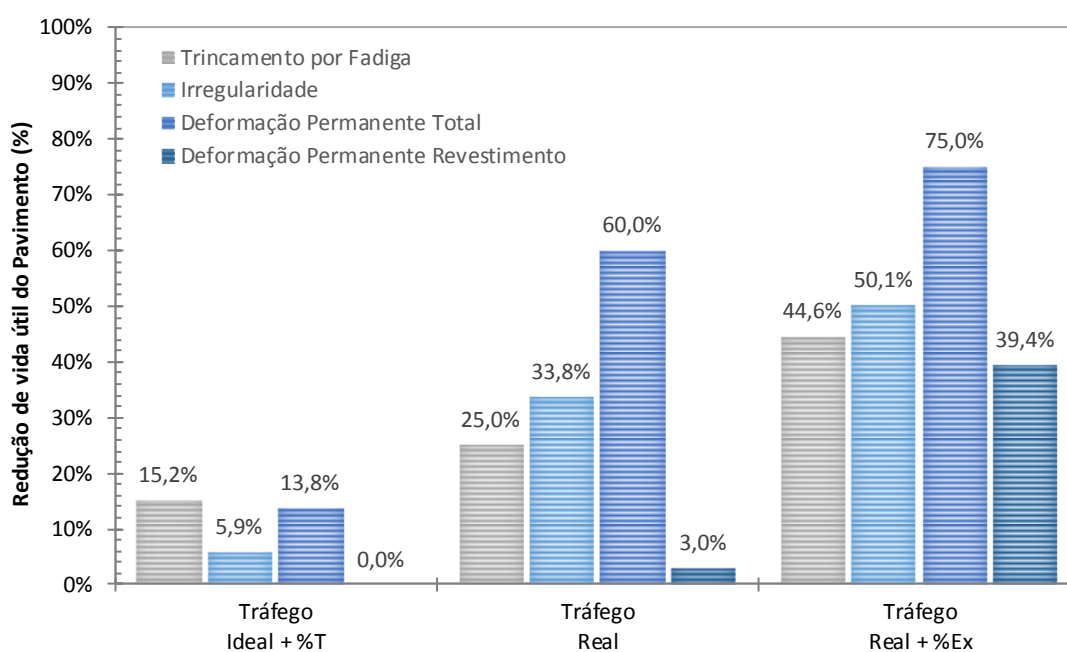


Figura 138 – Redução percentual da vida útil do pavimento quanto aos parâmetros analisados em relação aos diferentes níveis de carregamento simulados

5.4 Considerações sobre o acompanhamento de desempenho

A partir do programa de monitoramento dos trechos experimentais da rodovia BR-290/RS e BR-448/RS durante seus respectivos períodos de acompanhamento conforme dados apresentados no decorrer do presente capítulo foi possível acompanhar a evolução dos parâmetros de desempenho funcional e estrutural dos referidos trechos e estabelecer sua taxa de variação em função do tráfego solicitante.

Para os trechos da BR-290/RS, com um período mais extenso de monitoramento foi possível definir em quanto tempo após a abertura ao tráfego (ou após qual volume de tráfego) surgiram as primeiras manifestações patológicas (trincamentos, afundamentos, desgaste superficial) e, após o seu surgimento, observar qual a sua taxa de evolução. Foram observados trincamentos por fadiga do revestimento do Trecho 1 e um início de trincamento do Trecho 2, além das evoluções de irregularidade, afundamentos e desgaste do revestimento frente à solicitação acumulada do tráfego.

Já nos trechos da BR-448/RS, em função da robustez da estrutura e do período de monitoramento estar ainda em fase inicial (24 meses) não foi possível verificar manifestações patológicas expressivas, apenas foram avaliadas as taxas de variação dos parâmetros de desempenho. Observou-se, contudo, um desgaste expressivo da superfície de rolamento, com uma redução considerável da macrotextura até limites próximos a oferecer risco ao tráfego dos usuários (levando em consideração a velocidade diretriz da rodovia).

Através do acompanhamento da evolução das condições funcionais e estruturais dos pavimentos dos trechos monitorados foi possível definir uma correlação entre a evolução destas condições com modelos de previsão de desempenho desenvolvidos em âmbito nacional e internacional.

Por fim, dispondo dos dados de tráfego, com as respectivas cargas definidas através do estudo de tráfego WIM, as evoluções observadas em campo puderam ser comparadas com análises de previsão de desempenho realizadas através do software da AASHTO nos quais foram considerados distintos cenários de cargas e avaliadas as influências dos níveis de carregamento na degradação do pavimento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais sobre os resultados obtidos na presente pesquisa e apresentados nos capítulos anteriores. São sintetizadas as análises de tráfego e do acompanhamento de desempenho dos trechos monitorados, de forma a atender os objetivos propostos na pesquisa.

No âmbito do Projeto Rede Temática de Asfalto, cuja proposta é embasada no monitoramento de pavimentos em todo o território nacional, considerando diferentes estruturas, materiais com características distintas, técnicas construtivas, variações climáticas e de solicitações diferenciadas de tráfego, na pesquisa relatada nesta tese realizou-se o acompanhamento sistemático do desempenho de quatro pavimentos construídos no estado do Rio Grande do Sul, a partir de 2010.

Com o objetivo de melhor caracterizar as estruturas a serem monitorados, o acompanhamento de Pré-Execução e de Execução dos segmentos contemplou a caracterização dos materiais empregados e acompanhamento do processo executivo. Estas etapas foram essenciais para o posterior acompanhamento da evolução do desempenho na fase de Pós-Execução.

Conforme apresentado no decorrer da tese, o desempenho de pavimentos rodoviários se dá em função de uma série de fatores, tais como materiais empregados, técnicas construtivas, influências climáticas e as solicitações do tráfego, sendo este último o mais destacado na presente pesquisa. Sua influência reside em que quando excessos de cargas são praticados, ocorre uma degradação prematura, afetando significativamente o desempenho do pavimento.

Por essa razão nesta pesquisa buscou-se definir as características do tráfego solicitante (composição da frota e cargas nos eixos), por meio de contagens classificatórias e da definição das reais cargas transportadas, através de um desenvolvimento em paralelo com a Pesquisa WIM - Pesquisa de Pesagem em Movimento da ANTT/CONCEPA, realizada na BR-290/RS.

De posse dos dados obtidos, tanto de caracterização dos materiais e processos empregados na construção dos trechos analisados quanto do espectro de cargas, foi possível quantificar, através de simulações de desempenho realizadas com o software da AASHTO, a influência do tráfego na degradação do pavimento (considerando um cenário ideal de cargas e o cenário real observado).

A seguir serão apresentados, de forma sintetizada, as principais conclusões relacionadas aos itens analisados na pesquisa.

6.1 Sistemas de Fiscalização de Cargas e Definição do Tráfego Solicitante

De forma geral, o estudo de tráfego realizado juntamente com a Pesquisa WIM mostrou-se de grande importância para uma avaliação geral, não somente das cargas transportadas (determinação do espectro de cargas e cargas médias transportadas), mas também no âmbito de implantação e operacionalização de novas tecnologias no que diz respeito a sistemas de pesagem dinâmica de alta velocidade (*High Speed Weigh-in-motion – HS-WIM*).

A implantação de novas tecnologias de fiscalização e controle nas rodovias surge como o caminho mais adequado para a solução de uma série de demandas relacionados à atual situação da fiscalização de cargas no país. Sistemas como o HS-WIM podem trazer diversos benefícios para a melhoria do cenário nacional onde agravantes como postos de pesagem inoperantes, operação de balanças restrita ao horário comercial ou em períodos reduzidos, problemas de infraestrutura e rotas de fuga são alguns dos problemas atualmente enfrentados na fiscalização das cargas transportadas nas rodovias.

Tecnologia ainda incipiente no país, os sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade apresentam-se com grande potencial. Atualmente o DNIT, através do Plano Nacional de Pesagem, visa a utilização desta tecnologia em um novo conceito de fiscalização de cargas com a implantação dos PIAFs (Postos Integrados Automatizados de Fiscalização).

Neste conceito, os sistemas WIM servirão como balança seletiva, concentrando esforços nos veículos que de fato apresentam sobrecargas, evitando que os veículos em conformidade sejam penalizados por meio de espera, muitas vezes em longas filas, para verificação de sua carga em balanças fixas. Aumenta-se desta forma a eficiência da fiscalização.

Apesar das diversas vantagens apresentadas pelos sistemas, WIM existem ainda inúmeros desafios a serem vencidos em se tratando da sua operacionalização. Algumas das dificuldades encontradas dizem respeito à correta instalação do sistema e posteriormente à operacionalização do mesmo garantindo a coleta, armazenamento e transmissão de elevados volumes de dados, sem perdas. Ainda são necessárias adequações do sistema para identificação e classificação dos dados brutos obtidos em campo de forma organizada, conforme a classificação nacional de

veículos de carga. Estes foram aspectos que demandaram bastante empenho e conhecimento de programação para que se chegasse aos resultados de classificação da frota e análise de carregamentos apresentados na presente tese.

No aspecto de classificação da frota circulante foram obtidos resultados muito bons que puderam ser comparados diretamente com os resultantes da operação do posto de pesagem da rodovia (PPVM), porém esta avaliação dos dados só foi possível após desenvolver-se uma metodologia de classificação a partir dos dados brutos gerados pelo sistema WIM. Estima-se que a longo prazo, a utilização de Sistemas WIM no Brasil ainda enfrente algumas dificuldades até chegar a um nível de utilização em seu potencial máximo, semelhante ao que ocorre principalmente nos países europeus e nos Estados Unidos, onde há fiscalização totalmente automatizada.

Contudo, o equipamento instalado no km 72 da BR-290/RS demonstrou boa confiabilidade dos dados coletados, ao serem comparados com os dados da balança de precisão do PPVM, no km 65 da rodovia. A curto prazo pode-se concluir que é uma ótima tecnologia para obtenção de dados de classificação da frota e determinação do espectro de cargas para fins de pesquisa e fiscalização seletiva.

O desenvolvimento em paralelo de duas pesquisas importantes para uma melhor compreensão do desempenho de pavimentos rodoviários, sendo uma relacionada ao Programa Rede Temática de Asfalto e outra relacionada à implantação de uma nova tecnologia de fiscalização de cargas por meio de sistemas de pesagem em movimento no RS através da Pesquisa WIM, abriu um enorme potencial de interação e cooperação para um melhor entendimento da correlação entre as reais solicitações do tráfego e o desempenho esperado do pavimento.

Desta forma foi possível realizar um estudo detalhado do tráfego da BR-290/RS que permitiu avaliar de forma apurada as solicitações às quais o pavimento está submetido durante a sua vida útil, suprimindo a incógnita muitas vezes presente sobre as reais cargas que trafegam nas rodovias. Foi possível uma contabilização do completo espectro de cargas rodante no trecho através do Sistema WIM, definição das principais configurações dos veículos de cargas que circulam na rodovia e definição das cargas por eixo que solicitam o pavimento, através de um amplo banco de dados.

As definições do tráfego nos trechos das rodovias analisadas (BR-290/RS e BR-448/RS) foram realizadas de formas distintas, para a primeira conseguiu-se realizar uma ampla caracterização

do tráfego, já para a segunda foi realizada apenas uma classificação volumétrica do tráfego, sem a possibilidade de definição das cargas circulantes.

Foi possível contar, classificar e pesar, durante o período definido para análise (Janeiro a Dezembro de 2014), quase que a totalidade dos veículos comerciais circulantes na rodovia. Confrontando os dados de tráfego obtidos através do sistema WIM (instalado em duas das três faixas da rodovia) com os volumes médios diários fornecidos pelo posto de pedágio tem-se nos primeiros 6 meses um percentual de monitoramento do tráfego comercial superior a 89% (considerando como 100% os dados obtidos no pedágio).

No segundo semestre, em função de algumas dificuldades técnicas este percentual sofreu um decréscimo, chegando-se a percentuais de 53% em outubro. Entretanto, uma vez reestabelecido o sistema, em dezembro de 2014, o percentual do tráfego comercial real captado pelo sistema WIM novamente alcançou um percentual acima de 90%.

Estes percentuais de monitoramento de cargas no tráfego total da via são bastante elevados ao serem comparados ao sistema de fiscalização “convencional” (PPVM) que apresentou valores muito reduzidos de monitoramento mensal, chegando no máximo a 10% da frota no primeiro trimestre, valores muito reduzidos nos cinco meses subsequentes (abril-agosto) e uma paralisação completa no restante do ano sem nenhum monitoramento de cargas na rodovia.

Desta forma, foi possível determinar os carregamentos praticados ao longo do período de pesquisa. As cargas médias observadas na frota no ano de 2014 para os eixos simples e em tandem foram: ESRS: 4.220 kgf, ESRD: 7.401 kgf, ETD: 14.974 kgf e ETT: 22.459kgf. Apesar das cargas médias estarem dentro dos limites legais, foram constatadas situações com excessos muito elevados em alguns eixos.

Os maiores percentuais de sobrecarga foram registrados nos eixos tandem duplo (ETD) com 20,0% de eixos sobrecarregados seguidos pelos eixos simples (ESRS) com 15,7% e eixos de rodas duplas (ESRD) com 10,3% dos eixos apresentando sobrecargas. Eixos em tandem triplo (ETT) representaram o menor percentual de eixos com sobrecarga, apenas 1,6%.

Analisando os níveis de sobrecargas nos referidos grupos de eixos, os maiores percentuais foram encontrados nos eixos em tandem (ETD e ETT) com 44,4% e 38,5% de excesso, respectivamente. Já os eixos simples (ESRS e ESRD) representam os menores percentuais de sobrecarga, porém não desprezíveis, representando 17,9% e 22,0%, respectivamente.

De uma forma geral, foram monitorados pelo sistema WIM ao longo do ano de 2014 um total de 874.918 veículos de carga, representando cerca de 2.558.236 eixos/grupos de eixos. Dentre os veículos monitorados um percentual em torno de 13% de veículos encontrava-se com cargas acima dos limites legais permitidos. Os excessos de carga praticados na rodovia chegam a valores muito elevados, o que torna imperioso o funcionamento de balanças e uma contínua fiscalização do tráfego, de forma a coibir os excessos.

É importante destacar que os percentuais de sobrecargas encontrados na presente pesquisa são semelhantes aos resultados de um estudo de tráfego realizado no ano de 2009 na região e uma análise dos excessos de cargas determinados para a mesma rodovia por Núñez *et al.* (2010), evidenciando que a sobrecarga é uma constância na vida do pavimento em questão.

Com base no tráfego observado, foi possível estimar a influência das cargas transportada nos parâmetros de desempenho da rodovia, principalmente no que diz respeito às sobrecargas, através da montagem de distintos cenários de cargas, principalmente um cenário ideal de cargas (considerado em projeto) e um cenário real (cargas efetivamente praticadas na rodovia).

6.2 Evolução de desempenho dos pavimentos monitorados

As análises de desempenho dos trechos monitorados foram realizados em distintas fases conforme explicitado na metodologia, porém maior ênfase é dada à realizada na fase de pós-execução. Após a construção dos trechos, através de análises periódicas da evolução dos parâmetros funcionais e estruturais, foi possível comparar as tendências observadas em campo e modelos de previsão de desempenho encontrados na literatura técnica e científica.

Após esta fase realizou-se uma avaliação da influência dos níveis de cargas no desempenho da estrutura do pavimento, quantificando os danos associados à deficiência na fiscalização.

A partir da coleta de dados e determinação da evolução dos parâmetros analisados em duas rodovias na região metropolitana de Porto Alegre tem-se contribuído com a alimentação de um banco de dados nacional de desempenho destas rodovias a fim de integrar o projeto de desenvolvimento de um novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos.

Além dos dados coletados em campo, a caracterização laboratorial dos materiais empregados na estrutura servirá de base para a calibração das funções de transferência para determinar os fatores laboratório campo, levando em consideração as especificidades regionais. Na avaliação

de desempenho realizada na presente pesquisa, foi possível determinar em que momento da vida útil do pavimento surgiram os principais mecanismos de degradação e como os mesmos evoluíram posteriormente.

Os primeiros indícios de trincamento da camada asfáltica foram observados no Trecho 1 da BR-290/RS (construído em dezembro de 2010) após o pavimento ter sido solicitado por um volume acumulado de tráfego equivalente a $N_{AASHTO} 4,00 \times 10^6$. Entretanto, o crescimento da área trincada manifestou-se de forma mais pronunciada a partir de solicitações acima de $N_{AASHTO} 6,49 \times 10^6$. De forma semelhante deu-se a evolução dos afundamentos nas trilhas de roda (ATR 4,0mm com $N_{AASHTO} 4,00 \times 10^6$) e o desgaste superficial da camada de rolamento ($N_{AASHTO} 5,00 \times 10^6$) com perda progressiva de macrotextura e com estimativa de atingir limites críticos de macrotextura fina com $N_{AASHTO} 1,00 \times 10^7$.

No segundo trecho da mesma rodovia, construído um ano após o primeiro, o surgimento dos mecanismos de degradação deu-se após o pavimento ter sido solicitado por volumes de tráfego ligeiramente superiores, excetuando-se o desgaste superficial, que foi mais intenso no Trecho 2.

Algumas das linhas de tendências de evolução observadas em campo se assemelharam bastante com as previstas por modelos consagrados na literatura, e utilizados de forma comparativa na presente tese, sendo os principais: os modelos de previsão de Irregularidade Longitudinal (Vitorello, 2008 e Patterson, 1987); Perda de Macrotextura Superficial (Mattos, 2009); Evolução dos Afundamentos nas Trilhas de Roda (AASHTO, 2002 e Vitorello 2008 - Trecho 1). Observa-se que alguns desses modelos (Mattos, 2009 e Vitorello, 2008) foram obtidos a partir de monitoramento de pavimentos construídos na mesma BR-290/RS.

É importante destacar que o desempenho do pavimento está não somente condicionado à qualidade dos materiais e do projeto executivo, mas também, de forma significativa, às técnicas executivas empregadas, sendo estas responsáveis pelos elevados valores de irregularidade inicial do Trecho 1, e também às condições do entorno da estrutura, como por exemplo a evolução mais acentuada dos afundamentos nas trilhas externas nas faixas externas onde é menor o confinamento.

Nos dois trechos da rodovia BR-448/RS, construídos no final de 2013, ainda não foi possível observar a ação dos mecanismos de degradação, o que em partes se deve à robustez da estrutura.

Em ambos os pavimentos, após dois anos de monitoramento, foram observados apenas afundamentos nas trilhas de roda (valores médios de ATR em torno de 4,8mm).

Quando da execução da camada final de rolamento foi observada uma significativa segregação da massa asfáltica, o que levou a uma variação acentuada da textura superficial dos trechos analisados, desde texturas muito finas até texturas muito rugosas. Posteriormente, nas avaliações periódicas de Macrotextura (mancha de areia) e Microtextura (pêndulo Britânico) observou-se um declínio acentuado de ambos os parâmetros, principalmente no segundo trecho.

A macrotextura inicialmente “Média” ($HS = 0,64\text{mm}$), atingiu os limites de textura “Fina” ($HS = 0,4\text{mm}$) após N_{AASHTO} igual a $3,00 \times 10^6$ (apenas 10 meses de tráfego). Em comparação, no Trecho 1 estes limites foram atingidos mais tardiamente (após 16 meses) com N_{AASHTO} de $4,45 \times 10^6$. Após 24 meses de abertura da rodovia ao tráfego os valores encontram-se próximos ao limite de uma condição de textura “Muito Fina” ($HS < 0,2\text{mm}$).

Estes valores são preocupantes tendo em vista a redução de aderência pneu-pavimento e a formação de películas de água na superfície, juntamente com um acúmulo maior de água nas trilhas de roda, o que pode afetar consideravelmente a segurança dos usuários da rodovia.

Após a determinação das curvas de desempenho dos pavimentos analisados, principalmente da BR-290/RS, rodovia para a qual se dispõe de um detalhado levantamento de tráfego, foi realizada a identificação e simulação de diferentes cenários de espectro de cargas, nos quais foram avaliados cenários ideais, cenários reais observados e cenários com sobrecargas, para avaliação das consequências no desempenho do pavimento.

Na última fase da pesquisa procurou-se avaliar a influência dos diferentes cenários de cargas no desempenho do pavimento da rodovia BR-290/RS, empregando-se o software da AASHTO (AASHTOWare Pavement ME Design).

Os resultados foram analisados considerando um período de projeto de 10 anos, possibilitando estabelecer um percentual de redução da vida útil do pavimento, quando se considera o cenário real de carregamento em relação a um cenário ideal de cargas. Constatou-se que a adoção do cenário de sobrecargas praticado na rodovia (ao invés do cenário ideal) causou uma redução da vida útil da ordem de 25% (23 meses), quando o mecanismo de degradação considerado é o trincamento por fadiga e de 34% (29 meses) quando se considera a Irregularidade Longitudinal.

Ao considerarem-se as deformações permanentes totais, a adoção do tráfego real ao invés do cenário ideal, o tráfego real causaria uma redução na vida útil do pavimento de praticamente 60% (48 meses); porém estes dados necessitam de um cuidado especial ao serem analisados, tendo em vista que, sabidamente os modelos de deformação permanente da AASHTO são muito conservadores (superestimam as deformações).

Avaliando a influência dos limites de “tolerância” de carga nos eixos (10% a mais) foram estimadas reduções da vida útil do pavimento da ordem de 15% (14 meses) ao se considerar o limite estabelecido de trincamento por fadiga do revestimento asfáltico (20% de área trincada), de praticamente 14% (11 meses) em relação à deformação permanente total do pavimento e 6% (5 meses) quanto ao limite de Irregularidade (limite de 2,7 m/km).

Desta forma foi possível prever a magnitude dos danos causados pela circulação dos veículos comerciais sem controle e fiscalização de cargas transportadas. Tendo em vista que este cenário de deficiência na fiscalização é recorrente na grande maioria das rodovias brasileiras e que a prática de sobrecarga é cada vez mais presente no contexto nacional, entende-se por que os pavimentos têm sua vida útil expressivamente reduzida.

6.3 Importância Geral dos Fatores Analisados

Finalizando esta ampla abordagem resta concluir sobre a importância geral dos fatores analisados na pesquisa relatada nesta tese.

O tráfego, entre outros fatores, tem extrema importância no desempenho dos pavimentos e a sua completa caracterização é fundamental para os projetos de pavimentos novos e gerência de pavimentos existentes a fim de determinar com maior eficiência as intervenções a serem realizadas durante a sua vida útil. Para tanto necessita-se de metodologias de fiscalização de cargas mais eficientes do que o atual sistema.

Existe a necessidade de conciliar novas tecnologias a fim de otimizar o processo de fiscalização, não penalizando os demais transportadores que estão dentro das conformidades da lei através de longas filas de espera. Além de evitar a degradação prematura dos pavimentos, uma fiscalização eficiente de cargas potencializa a segurança dos demais usuários da via.

Os sistemas de pesagem em movimento (sistemas WIM) já estão presentes com uma alternativa a ser implantada pelo novo Plano Nacional de Pesagem do DNIT. Neste novo sistema os

dispositivos de pesagem dinâmica atuarão em conjunto com os atuais postos fixos como balanças seletivas, identificando os veículos potencialmente sobrecarregados e direcionando os mesmos para verificação em balanças fixas. Os sistemas de pesagem WIM apresentam-se como uma grande potencialidade, porém alguns desafios ainda precisam ser enfrentados.

Um destes desafios está voltado à implementação de uma sistemática de classificação da frota fiscalizada segundo órgão nacional (DNIT) para padronização dos dados brutos adquiridos (distanciamento entre eixos e pesos dos eixos) já durante a coleta dos dados, etapa que atualmente ainda não é realizada pelos sistemas disponíveis no mercado. Dessa forma será possível analisar de forma mais ágil os dados de espectro de cargas, sem a necessidade de uma onerosa etapa de “modelagem” dos resultados em planilha eletrônica ou banco de dados, conforme foi realizado na presente pesquisa.

Sabe-se que atualmente estes sistemas ainda estão em fase de homologação no Brasil, havendo ainda a necessidade de sistemas convencionais para conferência final da carga do veículo para autuação dos veículos excedentes na carga transportada. Porém, a sua utilização como balança seletiva ou mesmo o seu emprego da forma realizada na presente pesquisa torna-se uma importante ferramenta na definição do espectro de cargas para fins acadêmicos e na formação de um banco de dados sobre as reais cargas praticadas nas rodovias brasileiras.

Os aspectos mais importantes e inovadores desta pesquisa dizem respeito ao monitoramento contínuo do tráfego (24h/dia) totalizando praticamente 100% da frota de veículos comerciais da BR-290/RS com instalação de sensores WIM em duas das três faixas na Pista Sul da rodovia durante um período considerável de tempo (2013-2015) com um vasto banco de dados sobre as cargas da frota circulantes naquele trecho. E um fator de especial importância, faz-se o monitoramento sem comprometer o uso da rodovia, sem a necessidade de desvio dos veículos de carga para pesagem em balanças fixas ou de baixa velocidade, o que evita a perturbação do fluxo com a formação de filas por exemplo.

Vale destacar ainda, que o controle de cargas não é o único caminho a ser trilhado no âmbito das análises apresentadas para a melhoria das condições da infraestrutura rodoviária. Com o aumento dos níveis de tráfego e das cargas transportadas, após um adequado conhecimento dos reais níveis de cargas praticados precisa-se evoluir e incorporar estas informações aos métodos de dimensionamento. Ou seja, passar a projetar os pavimentos de acordo com as cargas que irão solicitar a estrutura do pavimento no decorrer de sua vida útil.

Finalizando, destaca-se que a realização de pesquisas para melhor conhecer as características de cargas que trafegam nas rodovias do país e o monitoramento de desempenho, como realizado na Rede Temática do Asfalto, nas mais diversas regiões do Brasil, estão propiciando grandes evoluções no conhecimento do comportamento dos pavimentos, materializadas em um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos, o SISPAV.

6.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após conclusão da presente pesquisa, dentro do escopo dos assuntos analisados, ainda existem diversos fatores que podem ser analisados de forma mais detalhada e podem ser abordados em novas pesquisas. Dessa forma, como complemento desta Tese são sugeridas as seguintes atividades:

- Dar continuidade ao monitoramento dos pavimentos, principalmente nos trechos da BR-448/RS para determinação do surgimento dos mecanismos de degradação, principalmente do trincamento por fadiga;
- Acompanhar a evolução acelerada do desgaste da camada de rolamento da BR-448/RS e propor atividades de readequação das condições de segurança;
- Realizar um estudo comparativo entre as duas rodovias atualmente em monitoramento (BR-290/RS e BR-448/RS) e estabelecer uma relação entre os mecanismos de degradação e a estrutura do pavimento;
- Ampliar os estudos de tráfego, principalmente de cargas, em outras rodovias do estado ou em demais rodovias monitoradas pelo Programa Rede Temática de Asfalto a fim de estabelecer os reais carregamentos e sua influência na degradação de distintas estruturas, materiais diferenciados e condições climáticas de outras regiões do país;
- Incorporar considerações dos carregamentos, principalmente de excessos de cargas, na concepção dos modelos de desempenho e fatores de transferência empregados pelo SISPAV;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.

_____. **Excessos de carga e pesagem de veículos rodoviários de carga**. Anais da III Semana de Engenharia de Produção e Transportes. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de Gerência de Pavimentos para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2007. 128p.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standard specification for highway Weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods - E1318-09**. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2009.

AUSTROAS - ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. Disponível em: <http://www.austroads.com.au/>. Acesso em 20/03/2014.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008, 362p.

BASÍLIO, R. **Análise do Comportamento de Pavimentos de Rodovias Estaduais de Goiás – Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BENEVIDES, S. A. S. E. **Modelos de Desempenho de Pavimentos Asfálticos para um Sistema de Gestão de Rodovias Estaduais do Ceará**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2006, 381p.

BERNUCCI, L.L.B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. 1995. 237 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BRASIL. **Lei nº 7.408 de 25/11/1985**. Estabeleceu uma tolerância máxima de 5% sobre o Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Transmitido por Eixo (PBTE). Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 26/11/1985.

BRASIL - **Relatório de Avaliação da Execução de Programas de Governo N° 17: Operação do Sistema de Pesagem de Veículos**. República Federativa do Brasil. Controladoria Geral da União. Secretaria Federal de Controle Interno. Brasília, Janeiro 2013.

BRASIL - Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Brasília, DF, 2006. Disponível em <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_pavimetacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: setembro/2015.

Brito, L.A.T., Ceratti, J. A. P., Núñez, W. P., Bock, A., Vitorello, T., Hirsch, F., Cronst, F., Cezimbra, R., Tiefensee, M. D., Matta, H.A.N. (2013) **Implantação de um sistema de pesagem em movimento em alta velocidade na rodovia BR-290/RS, FreeWay, para estudo de espectro de cargas comerciais rodantes**. Revista Estrada N°18, outubro de 2013. pag 22-28.

Brito, L.A.T., Bock, A. (2013) **Relatório Final de Pesquisa – Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)**. Porto Alegre/RS. Abril de 2013. 147p

CHOU, C. J. **Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington, D. C., n. 1539, p. 58-65. 1996.

CNT – **Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa Rodoviária 2015 – Relatório Geral**. Disponível em <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx>. Acesso em: maio2016.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. **Resolução n° 184/04 de 21/10/2005**. Alteração das Resoluções 12 e 68/98 do CONTRAN e revoga a Resolução 76/98 do CONTRAN. Brasília, 2005. 3p.

_____. **Resolução N.º 102**, de 21 de agosto de 1999. Estabelece a tolerância máxima de 7,5% sobre o peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas. Brasília, 1999a. 1p. CONTRAN, 1998^a

_____. **Resolução N.º 104**, de 21 de dezembro de 1999. Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos e estabelece critérios para aplicação de multas. Brasília, 1999b. 2p.

_____. **Resolução N.º 108**, de 21 de dezembro de 1999. Dispõe sobre a responsabilidade pelo pagamento de multas. Brasília, 1999c. 1p.

_____. **Resolução N.º 114**, de 5 de maio de 2000. Complementa a resolução 104/99 e autoriza uma tolerância de 5,0% sobre o peso bruto declarado na nota fiscal. Brasília, 2000. 1p.

_____. **Resolução N.º 12**, de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Brasília, 1998a. 4p.

_____. **Resolução N.º 164**, de 10 de setembro de 2004. Acresce parágrafo único ao art. 1º da Resolução nº 68/98. Ficam dispensados da AET, os veículos com Peso Bruto Total – PBT Superior a 45t e até 57 t. Brasília, 2004. 2p.

_____. **Resolução N.º 258**, de 30 de novembro de 2007. Regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2007. 5p.

_____. **Resolução N.º 489**, de 05 de junho de 2014. Altera os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30 de novembro de 2007, do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, que regulamenta os artigos 231 e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2014. 2p.

_____. **Resolução N.º 62**, de 21 de maio de 1998. Estabelece o uso de pneus extralargos e define seus limites de peso de acordo com o parágrafo único do art. 100 da CTB. Brasília, 1998b. 4p.

_____. **Resolução N.º 68**, de 23 de setembro de 1998. Estabelece os requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC's. Brasília, 1998c. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: DNER – Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica, 1998. 243p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; LABORATÓRIO DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA – LATRANS; NÚCLEO DE ESTUDOS DE PESAGEM – NEP. **Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento: Fase 1 – Avaliação das Metodologias de Pesagem em Movimento Existentes**. Convênio 102/2007. Novembro de 2007. Disponível em <<https://gestao.dnit.gov.br>>. Acesso em: Outubro/2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro: IPT, 2006.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: IPT, 2006.

_____. **Quadro de Fabricantes de Veículos**. Brasília, 2012. 109p.

DNIT 2015 – **Reportagem**: Núcleo de Estudos de Pesagem por P. Goncalves — publicado 08/06/2010 14h50, última modificação 28/05/2015 16h37.

Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). **Pesquisa Frota de Veículos no Brasil**. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br/frota2015.htm>>. Acesso em: abril 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES – GEIPOT.
Relatório

Intermediário: Resultados e análises preliminares – Pesquisa ICR. Brasília, DF. 1997.

ELKINS, G. E.; SCHMALZER, P.; THOMPSON, T.; SIMPSON, A. **Long-Term Pavement Performance Information Management System Pavement Performance Database User Guide**. Federal Highway Administration (FHWA), 2003.

FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos Efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

FHWA, Federal Highway Administration. **Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: Conditions & Performance**. U.S. Department of Transportation, 2006.

FONTENELE, H. B. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho de pavimentos**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2007.

GEIPOT, 1982. **Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR). Relatório Final – 1981**. Ministério dos Transportes. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Brasília, DF, 1982.

GONÇALVES, F. J. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis**. Seminário II de doutorado, PPGEC/UFRGS, 1999.

HAAS, R. C. G.; HUDSON, W. R. **Pavement management system**. New York: McGraw-Hill, 1978. 464p. Apud BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo. Oficina de textos, 2007.

JACOB, B. **Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe**. Final Report of the Project WAVE, LCPC, Paris, 2002, 103 pp.

LERCH, R. L. **Previsão de Irregularidade Pós-recape em Rodovias do RS: Ajuste do Modelo HDM-4**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. 108 p.

MARCON, A. F. **Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina.** Tese (Doutorado em Infraestrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

MARTINS, R.; SERRA VALE, A. **Gerenciamento de controle de pesagem dos veículos de carga nas rodovias estaduais do estado da Bahia: o futuro das nossas rodovias.** Anais do 38 Reunião Anual de Pavimentação, Manaus, ABPv, 2007.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS - A implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2014, 250f.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009, 137 f.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. 366p. Tese (Doutorado em ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Apud BERNUCCI, L. B.; et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

NAKAHARA, S. M. **Estudo de Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Vias Sujeita a Tráfego Comercial Pesado.** Tese de doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2005. 312 p.

NASCIMENTO, L. A. H. **Estado da arte no dimensionamento de pavimentos flexíveis e aplicabilidade no cenário nacional.** In: 21º Encontro do Asfalto, 2014, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: 21º Encontro do Asfalto, 2014.

NCHRP - NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.** Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois, 2004.

NÚÑEZ et al. **Relatório Final de Pesquisa – Análise dos efeitos de excessos de cargas e de alterações na composição de misturas asfálticas no desempenho de pavimentos flexíveis típicos da região sul do país.** Porto Alegre/RS. Abril de 2010. 143p

PATERSON, W. D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects.** World Bank Publications, Washington-DC, USA, 1987. Pedrosa, 2002

PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes. Planejamento estratégico dos transportes no Brasil: Um sucesso Mundial. Ministério dos Transportes, Secretaria de Política Nacional de Transportes. Apresentação, Santa Maria/RS, 2012. Queiroz (1981).

QUEIROZ, C. A. V. Modelos de Previsão do Desempenho para a Gerência de Pavimentos no Brasil. Ministério dos Transportes – Empresa Brasileira de planejamento de Transportes (GEIPOT), Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), Brasília - DF, 1984.

QUEIROZ, C. A. V. Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil. Dissertation for the Degree of Philosophy Doctor, University of Texas, Austin – Texas, USA. 317 p. 1981.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 1.ed. Napa Education Fundation, Lenham, Maryland, 1991.

SILVA, J. P. S. Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários. Dissertação de Mestrado (ENC/FT/UnB, Mestre em Geotecnia), Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Distrito Federal, 2008, 134p.

SPECHT, L. P. Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VIANNA, G. A. B. O Mito do Rodoviarismo Brasileiro. 02ª Ed. São Paulo: NTC&Logística, 2007.

VITORELLO, T. Análise de desempenho de estrutura de pavimento flexível da rodovia BR-290/RS no trecho Osório-Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. 155p.

WIDMER, J. A. Compatibilidade de Tráfego de bitrens de 25 m com a infraestrutura viária brasileira. 2º Colóquio Internacional de Suspensões e 1º Colóquio de Implementos Rodoviários da SAE-Brasil. Caxias do Sul, 2002.

YSHIBA, J. K. Modelo de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.